

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Studium mikrostruktury a mechanických vlastností ocelových vzorků  
zhotovených 3D tiskem

Study of the Microstructure and Mechanical Properties of the Steel Samples  
Manufactured by 3D Printing

Student:

Bc. Jan Dobrovolný

Vedoucí diplomové práce

doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Dobrovolný**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: Studium mikrostruktury a mechanických vlastností ocelových vzorků  
zhotovených 3D tiskem  
Study of the Microstructure and Mechanical Properties of the Steel  
Samples Manufactured by 3D Printing

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii současného stavu technologie 3D tisku kovů.
2. Popište základní destruktivní zkoušky včetně metalografie.
3. Navrhněte zkušební vzorky pro 3D tisk.
4. Na zhotovených vzorcích proveďte vybrané zkoušky mechanických vlastností a metalografickou analýzu.
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky a vyslovte závěry

Seznam doporučené odborné literatury:

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010, 459 s. ISBN 978-1-4419-1119-3

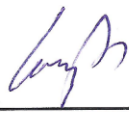
KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I.* skriptu VŠB – TUO. Ostrava: VŠB – TUO, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017

Dobrovský  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15. 5. 2017

Jan Dobrovolný  
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jan Dobrovolný

Adresa trvalého pobytu autora práce: Černá cesta 120/49, Olomouc

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DOBROVOLNÝ, J. *Studium mikrostruktury a mechanických vlastností ocelových vzorků zhotovených 3D tiskem: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017, 100 s.

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Cílem diplomové práce je zhodnocení a srovnání mechanických, strukturních a chemických vlastností ocelových výrobků vyrobených technologií 3D tisku SLM. První část práce se zabývá problematikou 3D tisku kovů a stručnou charakteristikou měřících a zkušebních metod, kterých bude při studiu vlastností výrobků využito. Úvod druhé části práce se zabývá stručnou charakteristikou vstupního materiálu, provedením návrhu vhodných vzorkových těles a popisem výroby těchto těles. Obsahem hlavního oddílu druhé části je pak provedení plánovaných zkoušek a měření včetně zhodnocení výsledků.

## ANNOTATION OF MASTER'S THESIS

DOBROVOLNÝ, J. *Study of the Microstructure and Mechanical Properties of the Steel Samples Manufactured by 3D Printing: Master's Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2017, 100 p.

Thesis supervisor: doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Aim of the Master's thesis is evaluation and comparison of mechanical, structural and chemical properties of steel samples manufactured by 3D printing technology SLM. First part of thesis is focused on problematics of metal 3D printing and on brief characterisation of measuring and testing methods which will be used for study of samples' properties. The introduction of second part of the thesis deals with brief characterisation of used input material, design of test samples and description of manufacturing process of said samples. The content of main section of second part consists of execution of planned tests and measurements, and evaluation of the results.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
1 Úvod .....	10
2 3D tisk kovů .....	11
2.1 Technologie 3D tisku kovů .....	11
2.1.1 Selective Laser Melting .....	11
2.1.2 Selective Laser Sintering .....	13
2.1.3 Electron Beam Melting .....	13
2.1.4 Binder Jetting .....	14
2.1.5 Beam Deposition .....	15
2.1.6 Laminated Object Manufacturing .....	16
2.1.7 Wire + Arc Additive Manufacturing .....	17
2.2 Obecný postup přípravy a výroby .....	18
2.3 Specifika a omezení technologií 3D tisku kovů.....	19
2.3.1 Výhody a nevýhody technologií 3D tisku kovů.....	20
2.3.2 Limity a omezení technologií 3D tisku kovů .....	20
2.3.3 Prognóza.....	21
2.4 Problematika výroby kovových výrobků metodou SLM.....	21
2.4.1 Pórovitost.....	21
2.4.2 Mikrotrhliny, trhliny a delaminace.....	23
2.4.3 Tvorba kovových kapek .....	24
2.4.4 Makroskopické deformace .....	24
2.4.5 Zbytková pnutí .....	25
3 Destruktivní materiálové zkoušky a metalografie .....	26
3.1 Zkouška tahem .....	26
3.1.1 Zkušební zařízení .....	26
3.1.2 Zkušební těleso.....	27
3.2 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy .....	27
3.2.1 Zkušební zařízení .....	28
3.2.2 Zkušební těleso.....	28
3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	29

3.4	Metalografie .....	30
3.4.1	Makrostruktura .....	31
3.4.2	Mikrostruktura.....	31
3.5	Optická emisní spektrometrie .....	34
3.6	Mössbauerova spektroskopie .....	34
4	Návrh a výroba vzorkových těles .....	36
4.1	Charakteristika materiálu .....	36
4.2	Návrh vzorkových těles.....	37
4.3	Výroba vzorkových těles.....	39
5	Zkoušky a měření .....	46
5.1	Rozdělení těles a odběr vzorků .....	46
5.2	Metalografie .....	47
5.2.1	Hodnocení makrostruktury.....	48
5.2.2	Hodnocení mikrostruktury .....	54
5.2.3	Doplňkové mikrostrukturní hodnocení SEM elektronovou mikroskopií 65	
5.2.4	Mikrostrukturní hodnocení pomocí Mössbauerovy spektroskopie .....	70
5.2.5	Shrnutí výsledků metalografického hodnocení .....	72
5.3	Analýza chemického složení metodou GD-OES .....	73
5.4	Mechanické zkoušky .....	75
5.4.1	Zkouška tahem .....	75
5.4.2	Zkouška rázem v ohybu a hodnocení lomových ploch .....	78
5.4.3	Měření tvrdosti podle Vickerse .....	85
5.4.4	Vyhodnocení mechanických zkoušek .....	87
6	Závěr.....	89
7	Seznam použitých pramenů.....	92

## Seznam použitých značek a symbolů

AISI	americká materiálová norma	
A <sub>5</sub>	tažnost	[%]
BD	technologie „ukládání paprskem“	
BJ	technologie „tryskání pojiva“	
BSE	zpětně odražené elektrony	
CAD	počítačem podporované konstruování	
EBIC	proud indukovaný elektronovým paprskem	
EBM	technologie „tavení elektronovým paprskem“	
eV	elektron-Volt, jednotka kinetická energie	
GD-OES	optická emisní spektrometrie s doutnavým výbojem	
HB	tvrdost dle Brinella	[-]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]
HV30	tvrdost dle Vickerse při zatížení 294,2 N	[-]
KV	nárazová práce	[J]
KV <sub>2</sub>	nárazová práce při využití tělesa s V-vrubem a břitů o poloměru 2 mm	[J]
LOM	technologie „výroba laminovaného objektu“	
MIG	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu	
PBF	spojování částic ve vrstvě prášku	
R <sub>m</sub>	mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	smluvní mez kluzu, 0,2% plastické prodloužení	[MPa]
R <sub>p1,0</sub>	smluvní mez kluzu, 1,0% plastické prodloužení	[MPa]
SC	proud na vzorku	
SE	sekundární elektrony	
SEM	řádkovací elektronová mikroskopie	
Singlet	jedna špička ve spektru	
SLA	stereolitografické zařízení	
SLM	technologie „selektivní laserové tavení“	



SLS	technologie „selektivní laserové spékání“	
STL	souborový formát	
WAAM	technologie „aditivní výroba drátem a obloukem“	
Z	kontrakce	[%]
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu	
<sup>57</sup> Co	izotop kobalt-57	
<sup>57</sup> Fe	izotop železo-57	

# 1 Úvod

3D tisk, také znám jako Aditivní výroba či Rapid Prototyping zahrnuje řadu moderních a vysoce progresivních výrobních technologií založených na principu výroby předmětu postupnou tvorbou jednotlivých vrstev. Díky tomuto výrobnímu principu lze pomocí technologií 3D tisku na jednom zařízení vyrábět vysoce komplexní a mnohdy i jinak nevyrobitelné předměty.

3D tisk je nejčastěji spojován s výrobou z plastů, což je nejznámější a nejrozšířenější aplikace 3D tisku. V poslední době se ale do popředí dostávají i technologie sloužící k výrobě z jiných materiálů včetně kovů a slitin. 3D tisk z kovů a slitin nachází v dnešní době uplatnění ve výrobě prototypů a ve výrobě jedinečných a často tvarově složitých dílců například v oblasti výroby implantátů, či speciální kusové strojní výroby. Aby bylo možné tyto výrobky reálně využívat, je nutné znát jejich mechanické, strukturní, chemické a/nebo jiné vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou výsledkem kombinace vstupního materiálu, výrobního procesu a případného dodatečného zpracování. Jelikož nejrozšířenější technologie 3D tisku z kovů využívají principů spékání či navařování, tak jsou výsledné vlastnosti výrobků ovlivněny převážně metalurgickými procesy, ke kterým během těchto procesů dochází. Problematika těchto procesů a provázanost různých vstupních parametrů je z důvodu relativního mládí celého odvětví doposud značně neprobádána.

Předmětem této práce je provedení prvotního náhledu do mechanických, strukturních a chemických vlastností výrobků vyrobených z austenitické oceli AISI 316L metodou 3D tisku Selective Laser Melting - SLM a srovnání vlastností, kterých dosahují výrobky vyrobené různou kombinací výrobních parametrů a stupňů dokončení. Ke zjišťování vlastností výrobků bude využito řady zkoušek a měření, a to jmenovitě: zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu, měření tvrdosti, metalografického hodnocení makro a mikrostruktury, SEM elektronové mikroskopie, GD-OES spektrální analýzy a Mössbauerovy spektroskopie.

## **2 3D tisk kovů**

Technologie 3D tisku jsou sice trendem posledních let, ale samotná myšlenka 3D tisku pochází již z 80. let minulého století, kdy se objevily první patenty popisující výrobu trojrozměrných objektů pomocí postupné tvorby jednotlivých vrstev. Za nejvýznamnější z těchto patentů je obecně považován patent na stereolitografické zařízení (SLA – Stereo Lithography Apparatus), které roku 1983 vynalezl Charles Hull. Principem tohoto zařízení byla tvorba výrobku postupným vytvrzováním polymeru pomocí paprsku světla. Patent na tuto metodu byl Hullovi udělen roku 1986 a již roku 1987 se na trhu objevila první SLA tiskárna. Tato tiskárna se jmenovala SLA-1 a byla vůbec první 3D tiskárnou na trhu. V následujících letech došlo k velkému rozvoji technologií 3D tisku a již roku 1989 byl udělen patent na metodu laserového spékání prášku (SLS - Selective Laser Sintering), což byla první technologie 3D tisku umožňující výrobu z kovů. Rozvoj v oblasti 3D tisku pokračuje dodnes. [1,2]

V dnešní době existuje celá řada technologií 3D tisku, které se mezi sebou více či méně liší v principu činnosti a v možnostech výroby. Různé moderní metody umožňují výrobu z různých materiálů pro různé aplikace a řada z těchto metod umožňuje výrobu kovových výrobků.

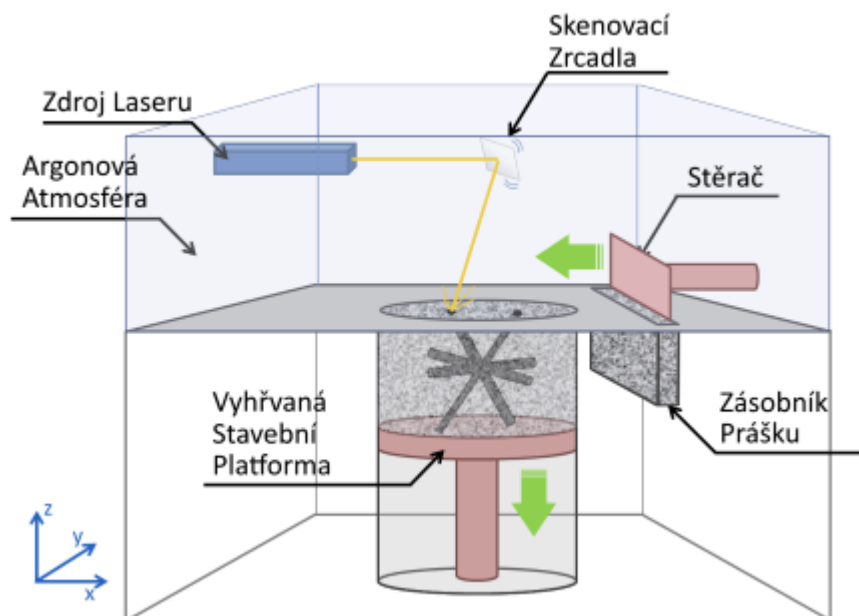
### **2.1 Technologie 3D tisku kovů**

Všechny technologie 3D tisku jsou založeny na principu stavby trojrozměrného objektu postupnou tvorbou jeho jednotlivých vrstev. Různé technologie 3D tisku umožňující výrobu z kovů využívají různých způsobů spojování materiálu při tvorbě a nanášení jednotlivých vrstev stavby. Tato různorodost způsobů spojování materiálů má za následek, že výrobky vyráběné odlišnými technologiemi mají odlišné výsledné vlastnosti. Nejběžněji využívanými způsoby spojování materiálu bývá navařování, spékání, pájení a lepení, či některé jejich kombinace.

#### **2.1.1 Selective Laser Melting**

Technologie Selective Laser Melting (SLM, „Selektivní laserové tavení“), je jedna z nejpoužívanějších technologií 3D tisku kovů. Tato metoda spadá do skupiny tzv. Powder Bed Fusion (PBF) metod, tedy do skupiny metod založených na principu spojování částic ve vrstvě prášku. Principem metody SLM je tvorba trojrozměrného objektu postupným selektivním tavením vrstev prášku. Při výrobě je na podklad nanесena vrstva prášku, která

je následně pomocí laseru selektivně přetavena, přičemž dochází i k přetavení podkladu, či předešlé vrstvy, čímž je dosaženo silného mezivrstevního spojení. Takto vytvořená vrstva se spolu s podkladem posune směrem dolů o šířku vrstvy a na již vytvořenou vrstvu se nanese nová vrstva prášku a celý cyklus se opakuje, dokud není celý výrobek hotov. Z důvodu ochrany roztaveného kovu probíhá výrobní proces v ochranné atmosféře tvořené Dusíkem či Argonem. Na obrázku 1 je uvedeno schéma SLM zařízení. [1,3]



Obr. 1: Schéma SLM zařízení [27]

Metodou SLM lze kromě kovů vyrábět také z plastů.

Výroba z kovů metodou SLM zpravidla vyžaduje využití podpěr, jejichž úkolem je bránit deformacím způsobeným teplotním pnutím a dále také bránit zborcení vytvářených převislých prvků. [1]

Hlavní výhodou metody SLM je tvorba relativně homogenních výrobků o vysoké hustotě, nízké pórovitosti a dobrých mechanických vlastnostech. Nevýhoda této metody je relativně nízká rychlost výroby a vysoká cena samotné technologie. Další nevýhodou metody SLM, ale také všech ostatních PBF metod je nutnost využití podpěr pod převislými prvky a dále nutnost zvýšených bezpečnostních opatření z důvodu hořlavosti, výbušnosti a zdravotní závadnosti některých prášků. [1,3]

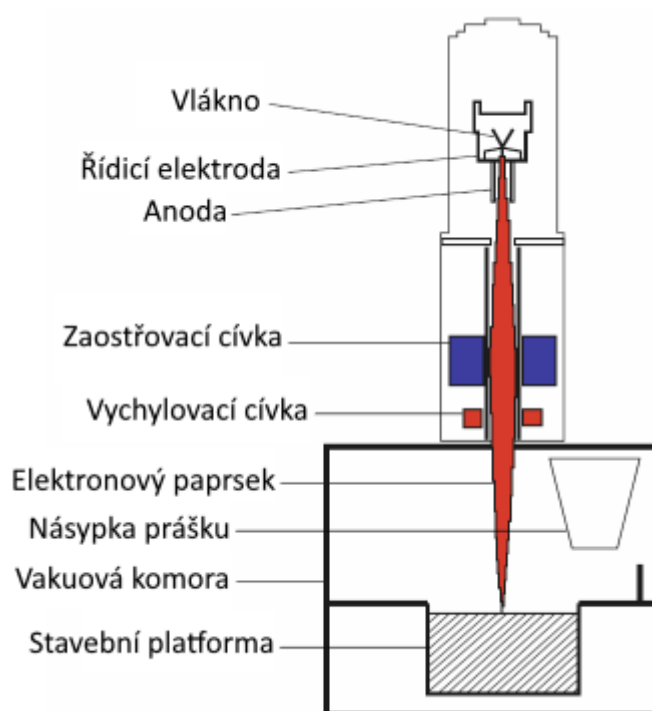
### 2.1.2 Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering (SLS, „Selektivní laserové spékání“), je obdoba technologie SLM a společně s ní se řadí do skupiny PBF metod. Použitá výrobní zařízení jsou podobná či stejná jako u metody SLM a i výrobní postup je do značné míry podobný. Metoda SLS se ale od metody SLM liší ve způsobu spojování částic prášku, kdy nedochází k tavení materiálu, ale pouze k jeho zahřátí a difusnímu spojení, tedy spékání. Podobně jako u metody SLM i zde lze vyrábět jak z kovů, tak z polymerů. [1]

Výrobky vytvořené metodou SLS mají oproti výrobkům vyrobeným metodou SLM mnohem vyšší pórovitost a z toho vyplývající horší mechanické vlastnosti. [1]

### 2.1.3 Electron Beam Melting

Technologie Electron Beam Melting (EBM, „Tavení elektronovým paprskem“), je obdobou metody SLM a společně s ní a s metodou SLS se řadí do skupiny metod PBF. Stejně jako u metody SLM i zde dochází k tvorbě výrobku postupným selektivním tavením vrstev prášku, ale na rozdíl od metody SLM se zde jako zdroje tepla využívá svazku elektronů na místo laseru a samotný proces výroby probíhá ve vakuu. Schéma EBM zařízení je uvedeno na obrázku 2. [1,4]

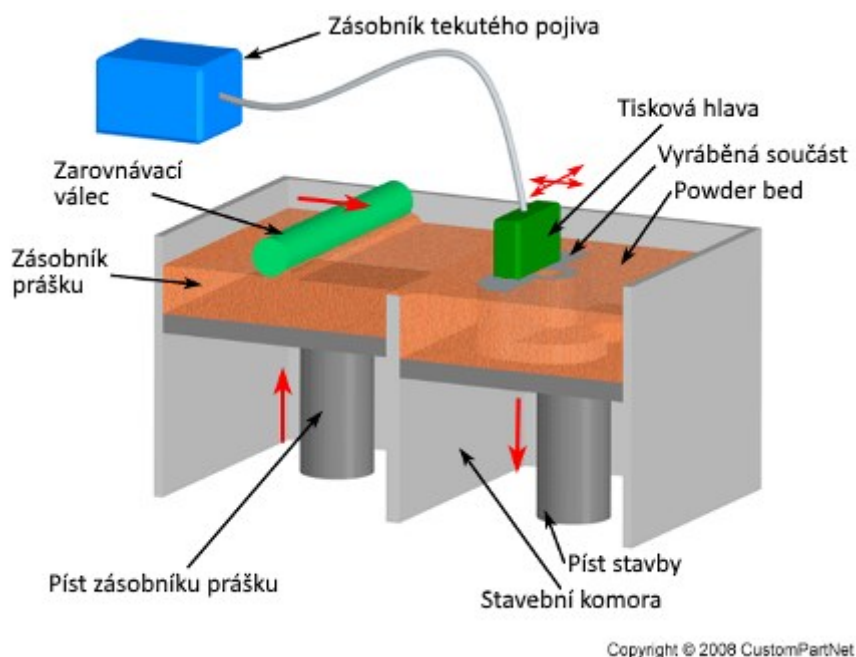


Obr. 2: Schéma EBM zařízení [1]

Stejně jako u technologie SLM i zde vznikají výrobky o nízké pórovitosti a dobrých mechanických vlastnostech. V porovnání s technologií SLM technologie EBM umožňuje rychlejší pohyb zdroje tepla, což značně zrychluje výrobu. Nevýhodou technologie EBM je nižší dosahovaná přesnost prvků a horší stav povrchu než je tomu u technologie SLM. Další nevýhodou metody EBM je možnost vyrábět pouze z vodivých materiálů. [1,4]

### 2.1.4 Binder Jetting

Technologie Binder Jetting (BJ, „Tryskání pojiva“) využívá lepidla, či jiné formy tekutého pojiva k lepení vrstev práškového materiálu. Při výrobě je nejprve na podklad nanесena vrstva prášku, na tuto vrstvu je následně tryskami selektivně nanесeno pojivo, které difunduje do prášku a prášek tak v daných oblastech spojí dohromady, podklad s čerstvě slepenou vrstvou se posune směrem dolů o tloušťku vrstvy a na již slepenou vrstvu se nanáší nová vrstva prášku a celý proces se opakuje. Tímto způsobem je vrstvu po vrstvě vytvořen celý výrobek. Na obrázku 3 níže je uvedeno jednoduché schéma BJ zařízení. [1,5]



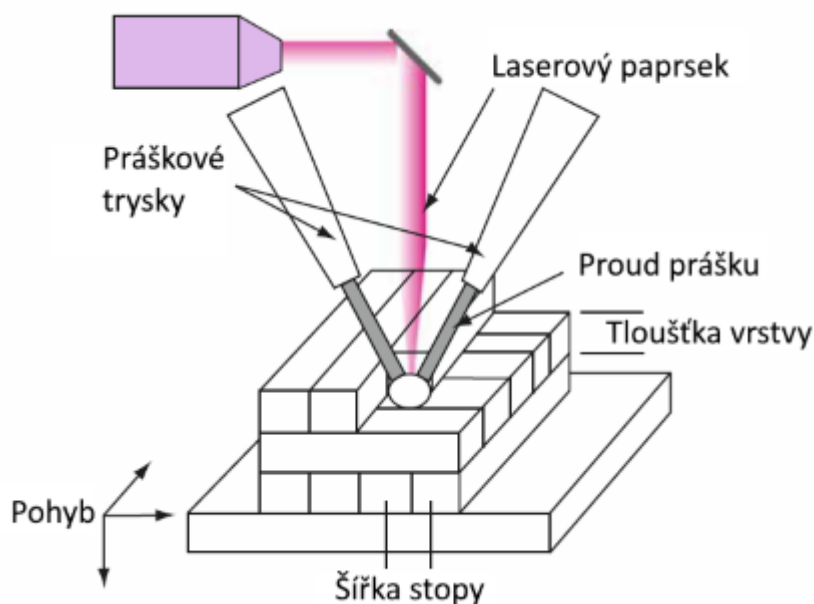
Obr. 3: Schéma BJ zařízení [28]

Mezi výhody metody Binder Jetting patří vysoká rychlost stavby, nízká cena technologie a možnost vyrábět z různých typů práškového materiálu a dokonce i z písku pro formy. Další důležitou výhodou metody BJ je možnost vyrábět převísle prvky bez nutnosti využití podpěr. Hlavní nevýhoda metody plyne z jejího principu, kterým je lepení

částic, což má za následek křehkost a nízkou pevnost výrobků. Tyto špatné mechanické vlastnosti ale mohou být do určité míry odstraněny postprocessingem ve formě dodatečného spečení či infiltrace. [1,5]

### 2.1.5 Beam Deposition

Beam deposition (BD, „Ukládání paprskem“) je metoda 3D tisku, kdy se trojrozměrný objekt vytváří postupným tavením a ukládáním materiálu na podklad, přičemž dochází k tavení materiálu i podkladu. Tato technologie je velice podobná klasické technologii navařování laserem či plasmou. Materiál je dodáván ve formě prášku, nebo drátu a zdrojem tepla bývá laserový, elektronový či plasmový paprsek. Metoda Beam Deposition se nejčastěji používá při výrobě kovových objektů, přičemž se obvykle využívá laserového paprsku, práškového přídavného materiálu a inertní ochranné atmosféry. Při výrobě paprsek laseru taví podklad a vytváří malou lázeň (o šířce max. 1 mm a hloubce max. 0,5 mm), do které je dodáván práškový materiál, tento se po vstupu do lázně roztaví a po odejetí zdroje tepla lázeň v daném místě ztuhne. Přejížděním této „navarovací“ hlavičky se vytváří stopa uloženého materiálu. Celá vrstva je pak vytvořena postupnou tvorbou částečně překrývajících se stop. Po dokončení celé vrstvy se „navarovací“ hlavička posune o šířku vrstvy a začne vytvářet vrstvu novou. Princip technologie BD je uveden na obrázku 4. [1]

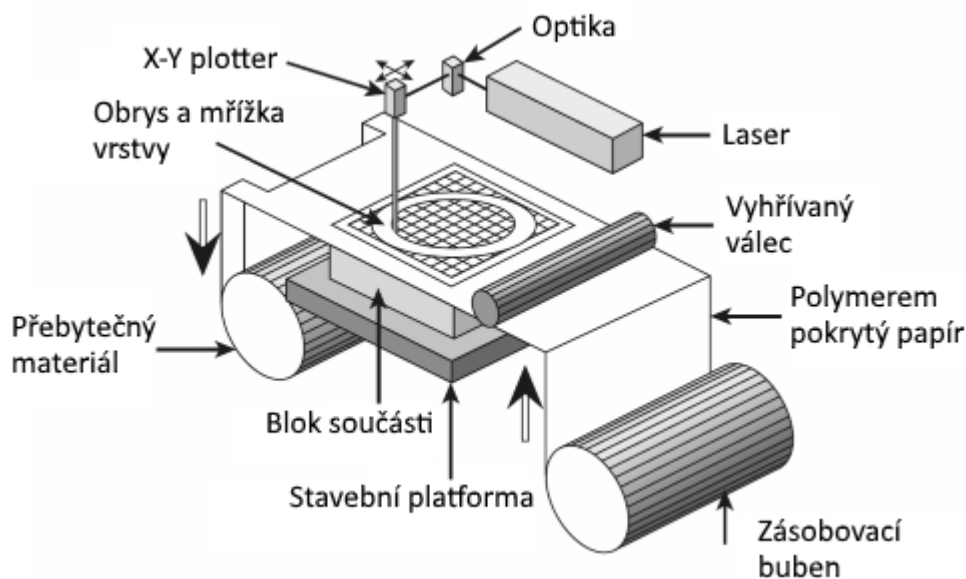


Obr. 4: Schéma principu technologie BD [1]

Metoda Beam Deposition je sice primárně určena pro výrobu z kovů, ale lze ji využít také k výrobě z polymerů, kompozitů, či z keramiky. Značnou výhodou metody BD je možnost vyrábět nejen na plochem podkladu základní desky, ale také na podkladu tvořeném již existující součástí či konstrukcí, což umožňuje tuto metodu využít při tvorbě dodatečných konstrukčních prvků. Mezi nevýhody metody BD patří nutnost využít podpěr při výrobě převýšených prvků, nižší dosahované přesnosti a nemožnost vyrábět komplexnější tvary, které lze vyrábět některými jinými metodami. [1]

### 2.1.6 Laminated Object Manufacturing

Technologie Laminated Object Manufacturing (LOM, „Výroba laminovaného objektu“), je založena na principu postupného nanášení celých vrstev materiálu a jejich následnému spojování. Tato technologie je spíše využívána při výrobě z plastů a papíru, ale existují i varianty umožňující výrobu z kovů. Jednoduché schéma funkce LOM zařízení je uvedeno na obrázku 5. [1]



Obr. 5: Schéma funkce LOM zařízení [1]

U technologie LOM se využívá dvou základních metod a to Bond-then-Form a Form-then-Bond. [1]

U metody Bond-then-Form tedy v překladu „Spoj-potom-Formuj“ se při výrobě nejprve nanese nová vrstva, ta se následně spojí s vrstvou předešlou či podkladem a nakonec se pomocí laseru nebo nože z této nové vrstvy ořeže přebytečný materiál. V případě výroby z kovů se jednotlivé vrstvy výrobku vytvářejí z pásek plněných kovem.

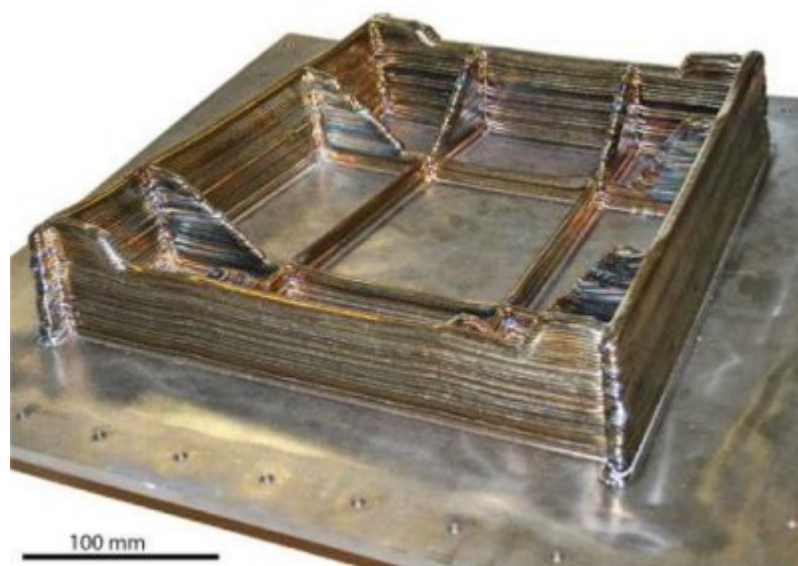


Takovéto kovové výrobky se poté zpracovávají v peci, kde dochází ke spečení v pásce obsažených částic kovu. [1]

V případě metody Form-then-Bond, tedy v překladu „Formuj-potom-Spoj“ se nejprve vyřeže tvar nové vrstvy a na předešlou vrstvu či podklad se již nanáší nová vrstva ve finálním tvaru. Tato LOM metoda se využívá pro výrobu z kovů a keramiky, ale její využití je spíše v oblasti výzkumu. [1]

### 2.1.7 Wire + Arc Additive Manufacturing

Technologie Wire + Arc Additive manufacturing (WAAM, “Aditivní výroba drátem a obloukem“) podobně jako technologie BD k vytváření výrobků využívá postupného navařování svarových vrstev. V případě metody WAAM se k navařování využívá klasických obloukových metod svařování, obvykle metody MIG (131). Jednotlivé svarové vrstvy jsou vytvářeny postupným tavením a ukládáním přídavného materiálu na částečně natavené předešlé vrstvy. Tavení materiálu je zajištěno elektrickým obloukem hořícím mezi podkladem (předešlou vrstvou) a přídavným materiálem, který je dodáván ve formě drátu. Celý proces navařování je chráněn zpravidla inertní ochrannou atmosférou. Posun svařovací hlavice při výrobě je obvykle zajištěn svařovacím robotem. Na obrázku 6 je uveden příklad výrobku. [6]



Obr. 6: Příklad výrobku vyrobeného technologií WAAM [29]

Značnou výhodou technologie WAAM oproti ostatním zmíněným technologiím je výrazně nižší cena technologie, což je způsobeno faktem, že WAAM „zařízení“ je v podstatě tvořeno pouze svařovacím zdrojem a svařovacím robotem, což jsou v průmyslu běžně využívaná zařízení. Další důležitou výhodou oproti ostatním technologiím je výrazně vyšší rychlost ukládání materiálu, což umožňuje rychlejší výrobu. Nevýhodou technologie WAAM (oproti ostatním zmíněným technologiím) je nižší dosahovaná přesnost prvků a nemožnost výroby vysoce komplexních struktur. Obecně lze říci, že technologie WAAM je vhodná pro výrobu méně složitých, ale zato mnohem rozměrnějších výrobků, než je tomu u ostatních zmíněných technologií. [6]

## 2.2 Obecný postup přípravy a výroby

Ač se jednotlivé technologie 3D tisku od sebe do určité míry liší, tak obecný postup výroby je pro všechny metody stejný. Tento obecný postup lze rozdělit do následujících osmi kroků: [1,7]

1. Tvorba 3D modelu – Prvořadým úkolem je vytvoření 3D modelu vyráběného objektu. Počítačový model lze vytvořit pomocí CAD softwaru, či pomocí 3D skeneru. CAD software lze v této fázi také využít k analýze objektu a včasnému odhalení konstrukčních či jiných nedostatků.
2. Konverze do formátu STL – V této fázi jde o převedení CAD modelu do formátu STL (Stereolithography), se kterým pracuje většina výrobních zařízení. Tento formát je založen na principu aproximace povrchu CAD modelu pomocí sítě trojúhelníků. Konverze CAD modelu do formátu STL je zpravidla jednoduchá, jelikož tato funkce bývá ve většině moderních CAD systémů obsažena. V případě, že konvertovaný model obsahuje chyby lze využít některý z opravných softwarů.
3. Převod STL souboru do výrobního zařízení – Po konverzi modelu do STL je nutné tento STL soubor přenést do řídicího počítače výrobního zařízení. Po převedení je vhodné provést kontrolu modelu. V řídicím počítači lze dále určit či změnit umístění a orientaci vyráběného objektu případně provést další drobné úpravy.
4. Příprava zařízení – V této etapě se jedná o přípravu zařízení a nastavení výrobních parametrů. Příprava zařízení značně závisí na typu technologie zařízení a zpravidla zahrnuje doplňování stavebního (vstupního) materiálu,

přípravu pracovní desky a pracovního prostoru a je-li to nutné tvorbu ochranné atmosféry či vakua. Nastavovanými výrobními parametry zpravidla bývá tloušťka vrstev, výkon laseru, rychlost skenování atd.

5. Stavba (výroba) – Samotný proces stavby je již zpravidla plně řízen počítačem a operátor spíše plní kontrolní funkci. Zařízení během stavby vytváří vyráběný objekt postupně vrstvu po vrstvě.
6. Separace a čištění výrobku – Po dokončení stavby je nutné výrobek odebrat z pracovního prostředí a očistit. U většiny technologií výroby z kovů je výrobek spojen se základní deskou podpěrami. Tyto výrobky je nutné od základní desky separovat například odlomením či odřezáním. U technologií, kde jsou vrstvy výrobku tvořeny selektivním spojováním prášku je nutné výrobek z prášku nejprve „vyhrabat“. Po oddělení výrobku je dále nutné jej očistit od zbytků těchto podpěr a případně od dalších cizích elementů.
7. Postprocessing – Tato etapa zahrnuje různé způsoby dokončování vytištěných výrobků. Způsoby a technologie, kterými se výrobek dokončuje, závisí na jeho stavu po výrobě a na požadavcích, které tento výrobek ve finále musí splňovat. Z výše zmíněného je zřejmé, že typ a rozsah metod dokončování značně závisí na technologii, kterou byl výrobek vyroben. Pokud jsou u výrobků vyžadovány lepší mechanické vlastnosti, tak se zpravidla využívá různých forem tepelného zpracování, jako je například žíhání na snížení pnutí. U výrobků s vysokou pórovitostí, jako jsou například výrobky vyráběné technologií BJ, se využívá spékání a infiltrace nízkotavitelnými kovy. V případě vyšších požadavků na stav povrchu se využívá tryskání, broušení či leštění.
8. Aplikace – Po dokončení postprocessingu jsou již výrobky připraveny k použití. Zde je vhodné zdůraznit, že výrobky vyrobené metodami 3D tisku se svými vlastnosti liší od výrobků vyrobených ze stejných materiálů konvenčními technologiemi. Výrobky vyrobené 3D tiskem mají zpravidla horší mechanické vlastnosti a tyto vlastnosti bývají navíc anizotropní. Častým problémem vytištěných výrobků bývá vysoká pórovitost.

## **2.3 Specifika a omezení technologií 3D tisku kovů**

3D tisk kovů představuje značný pokrok v oblasti výroby a oproti klasickým výrobním technologiím vykazuje řadu výhod, nicméně jako každá technologie i technologie 3D tisku mají určitá omezení a nevýhody, což určitým způsobem limituje vhodnost jejich aplikace.

### 2.3.1 Výhody a nevýhody technologií 3D tisku kovů

Vzhledem k různorodosti technologií 3D tisku kovů je těžké tyto technologie obecně hodnotit a proto byly základní výhody a nevýhody jednotlivých technologií zmíněny již v předešlé podkapitole a dále budou uvedeny pouze obecná specifika vztahující se spíše k celé oblasti 3D tisku kovů.

Výhody technologií 3D tisku kovů: [1]

- Možnost vyrábět jinak nevyrobitelné výrobky či prvky
- Univerzálnost a pružnost výroby
- Jednoduchost technologické přípravy výroby

Nevýhody technologií 3D tisku kovů: [1]

- Vysoká cena zařízení a materiálu
- Relativně špatné mechanické vlastnosti surových výrobků
- Nutnost dodatečného zpracování pro dosažení přesných tvarů a zlepšení vlastností
- U PBF metod zdravotní závadnost a hořlavost až výbušnost kovových prášků
- U tavných a spékacích metod vysoká energetická náročnost procesů

Ekonomičnost těchto technologií závisí na způsobu jejich využití. Technologie 3D tisku kovů se mohou stát velice výhodné v případě jejich racionálního nasazení. Příkladem takového použití může být využití 3D tisku pro nahrazení drahé a zdlouhavé výroby konvenčními technologiemi, nebo pro výrobu jinak nevyrobitelných součástí.

### 2.3.2 Limity a omezení technologií 3D tisku kovů

Mezi hlavní přednosti technologií 3D tisku patří schopnost vyrábět složité tvary a vysoce komplexní součásti, tato schopnost má ale své úskalí.

Maximální velikost vyráběného objektu či prvku je u tiskáren omezena rozměry pracovního prostoru či pracovní desky. Minimální velikost vyráběného prvku či objektu (včetně mezer a vůlí) je omezena možnostmi použitého zařízení a použité technologie. Podobně je tomu i s přesností výroby, kdy dosahovaná přesnost opět závisí na možnostech použité technologie a použitého zařízení. [1]

U tavných a spékacích metod 3D tisku kovů existuje omezení ve formě nutnosti využití podpěr při výrobě větších převýslých prvků či dutin. Toto omezení může být

problém například v případě, kdy se u větší dutiny vyžaduje plná průchodnost, přičemž nutné podpěry není možné odstranit dodatečným opracováním. [1]

Dalším důležitým omezením při 3D tisku z kovů je rozsah nabídky práškových materiálů, ze kterých lze vyrábět. V dnešní době jsou k dispozici prášky z několika druhů kovů a slitin, jako jsou například prášky z austenitické nerezové oceli, z hliníku, z titanu, z niklových slitin, z kobaltových slitin, a mnoho dalších. [8,9]

### **2.3.3 Prognóza**

Vzhledem k relativnímu mládí technologií 3D tisku kovů a vzhledem ke stále probíhajícímu bouřlivému rozvoji těchto technologií lze předpokládat, že mnoho z výše zmíněných nevýhod a omezení bude v budoucnu oslabeno či dokonce odstraněno a mnoho z výše uvedených výhod bude naopak posíleno.

## **2.4 Problematika výroby kovových výrobků metodou SLM**

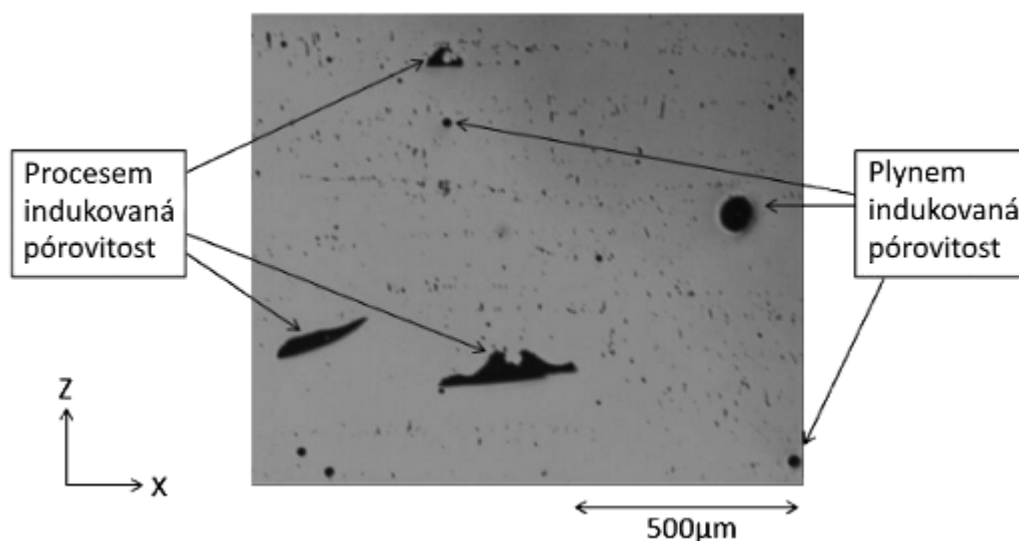
Hlavními problémy, se kterými se výroba metodou Selective Laser Melting (SLM) potýká, jsou termálně vyvozené deformace, delaminace, pórovitost, vznik trhlin a mikrotrhlin, a přítomnost zbytkových vnitřních pnutí. Všechny tyto problémy jsou spjaté s podstatou výrobního procesu, kterou je navařování vrstev postupným přetavováním prášku. Není proto překvapením, že se jedná v podstatě o stejné problémy, se kterými se je možné setkat u konvenčních technologií svařování či navařování. [10]

Přítomnost a rozsah zmíněných problémů je výsledkem kombinace mnoha faktorů, mezi které se řadí např.: typ materiálu, geometrie a pravidelnost částic prášku, strategie skenování, parametry skenování, typ ochranné atmosféry a další. [10]

### **2.4.1 Pórovitost**

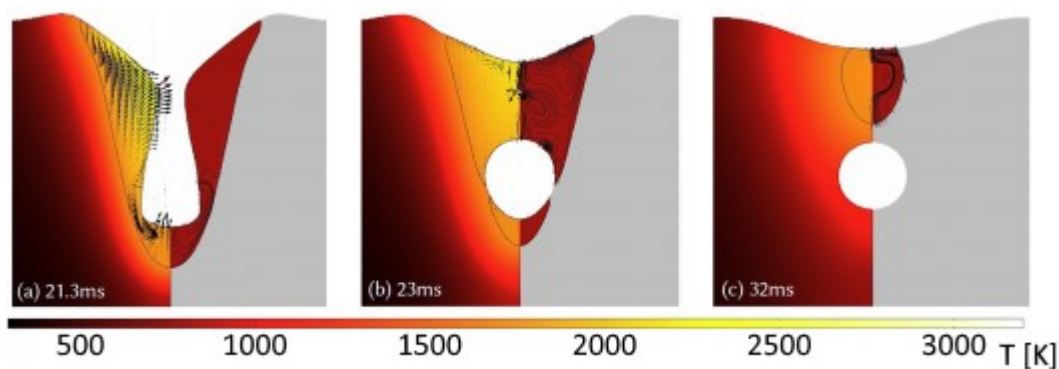
Přítomnost pórů ve struktuře výrobků je častý problém u všech PBF metod a to převážně u spékací metody SLS. U metody SLM se pórovitost vyskytuje v menší, ale nezanedbatelné míře. Přítomnost pórů negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti výrobků. Negativní vliv pórů závisí jak na koncentraci a lokalizaci pórů, tak na tvaru pórů. Zatímco relativně kulové póry v ideálním případě pouze snižují nosný průřez výrobku, tak tvarované póry s komplexní geometrií v materiálu navíc působí jako koncentrátoři napětí. U výrobků vyrobených metodou SLM lze pozorovat dva základní typy pórovitosti, kterými

jsou tzv. „procesem indukovaná pórovitost“ a „plynem indukovaná pórovitost“. Příklad obou typů pórovitosti je uveden na obrázku 7. [1,10]



Obr. 7: Typy pórovitosti [10]

Dominantním typem pórovitosti je tzv. „procesně indukovaná pórovitost“, která je výsledkem nevhodně zvolených výrobních parametrů. V případě příliš nízkého vnášeného tepla nedochází k dostatečnému přetavení, což má za následek vznik kapes nepřetaveného prášku. Naopak v případě příliš vysokého vnášeného tepla může docházet k částečnému odpařování materiálu, které může způsobit rozstřík a redepozici roztaveného kovu, což může také vést ke vzniku pórů. Vysoké vnášené teplo dále také může způsobit vznik tzv. klíčových dírek (fenomén vzniku plynové dutiny kolem paprsku jako výsledek odpařování materiálu), které mohou při svém zániku způsobit uvěznění plynu u dna vytvářené svarové vrstvy. Princip vzniku pórů při uzavírání klíčové dírký je vysvětlen na obrázku 8. Procesně indukované póry mají zpravidla nesférický, členitější tvar, výjimkou jsou póry vzniklé uzavřením klíčové dírký, které se mohou jevit kruhové či oválné. [10,11]



Obr. 8: Princip zachycení plynu při uzavření tzv. klíčové dírký [30]

„Plynem indukovaná pórovitost“ je typ pórovitosti charakteristický výskytem kulových či oválných pravidelných plynových pórů. Tento typ pórů může být pozůstatkem pórovitosti částic práškového vstupního materiálu. [10]

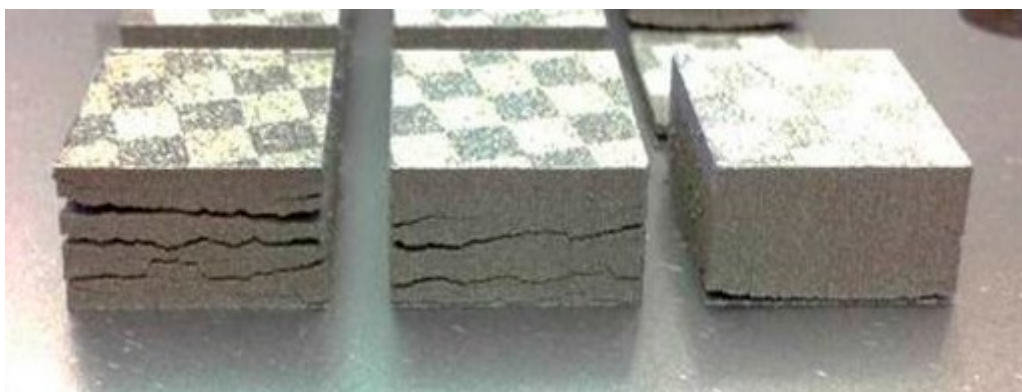
## 2.4.2 Mikrotrhliny, trhliny a delaminace

Mikrotrhliny, trhliny a delaminace jsou závažné defekty, které zhoršují pevnostní i plastické vlastnosti materiálu. Všechny tyto defekty jsou do určité míry způsobeny termálním pnutím.

Mikrotrhliny zpravidla vznikají z důvodu vysokého množství vnášeného tepla během výroby, ale mohou vznikat i po výrobě během tepelného zpracování. Vznik mikrotrhlin je značně závislý na typu materiálu. Krystalizační mikrotrhliny mohou vznikat při tuhnutí, kdy mezi ztuhlou a stále tekutou částí svarové lázně dochází ke vzniku značných termálních pnutí. Interkrystalické trhliny vznikají na hranicích zrn a jejich vznik značně závisí na chemickém složení materiálu a to především na sklonu k precipitaci částic. [10]

Makroskopické trhliny jsou obvykle výsledkem termálních pnutí a oslabené struktury a vznikají například propojením pórů či mikrotrhlin. Makroskopické trhliny mohou také vznikat jako produkt delaminace. [10]

Delaminace vrstev je makroskopický defekt, kdy z důvodu nedostatečného natavení prášku a/nebo z důvodu nedostatečného přetavení předešlé vrstvy dochází vlivem termálních pnutí k odtržení vytvářených vrstev, což vede ke vzniku rozsáhlých trhlin. Na obrázku 9 jsou uvedeny příklady různě rozsáhlých makroskopických trhlin a delaminací. [10]



Obr. 9: Makrotrhliny a delaminace vzniklé při výrobě technologií SLM [10]

### 2.4.3 Tvorba kovových kapek

Kovové kapky či kuličky vznikají, když se roztavený kov zformuje do kulového tvaru (namísto smáčení předešlé vrstvy), příklad tohoto typu defektu je uveden na obrázku 10. Podle teorie tvorba kapek nastává v případě nevhodného tvaru svarové lázně, kdy v případě poměru délky k šířce lázně větším než 2:1 začne svarová lázeň z důvodu povrchového napětí přecházet do kulového tvaru. [10]

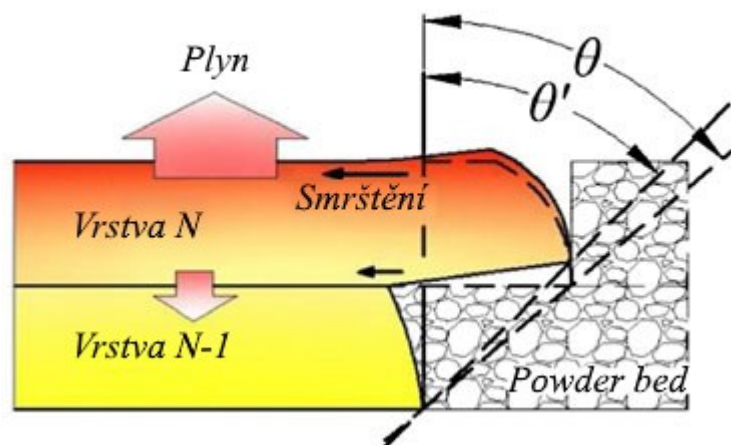


Obr. 10: Kovové kuličky vzniklé při výrobě technologií EBM [10]

### 2.4.4 Makroskopické deformace

Makroskopické deformace vytvářených vrstev či prvků jsou následkem termálních pnutí vznikajících v důsledku nerovnoměrného smršťování materiálu při chladnutí. Ke smršťování materiálu dochází především v horní části vytvářené vrstvy, což má za následek, že v horní části dochází ke vzniku tahových napětí. Tato tahová napětí mohou překonat termálně sníženou pevnost materiálu a způsobit tak plastickou deformaci, která se ve výsledku projeví jako ohyb vytvářené vrstvy směrem vzhůru (tzv. zvednutí). Princip vzniku makroskopických deformací je uveden na obrázku 11. [10,12]





Obr. 11: Princip vzniku makroskopických deformací [12]

K těmto deformacím dochází především při výrobě přepisných prvků, kdy se vytvářené vrstvy snadno deformují, jelikož nejsou drženy již vytištěnými vrstvami. Obranou vůči tomuto typu deformací je použití vhodných podpěr, které dokáží vyrovnávat termálně vyvozená tahová pnutí. [10,12]

#### 2.4.5 Zbytková pnutí

Zbytková pnutí jsou v materiálu nežádoucí, jelikož mají negativní dopad na pevnostní a plastické vlastnosti materiálu a mohou podporovat vznik a šíření trhlin. Zbytková pnutí jsou pozůstatkem termálních pnutí, která v materiálu vznikají jako následek opakovaného zahřívání a ochlazování materiálu při navařování vrstev. Charakter zbytkových napětí bývá tlakový poblíž středu výrobků a tahový poblíž povrchu. Pro snížení zbytkových pnutí se u výrobků někdy zařazuje postprocessing ve formě žhání ke snížení vnitřních pnutí. [10]

### **3 Destruktivní materiálové zkoušky a metalografie**

Kovové výrobky vyráběné technologiemi 3D tisku vykazují odlišné vlastnosti od výrobků vyráběných konvenčními technologiemi. Tyto odlišnosti jsou výsledkem způsobů spojování materiálů, kterých je u technologií 3D tisku využíváno. U většiny technologií 3D tisku kovů se využívá principů svařování či spékání částic kovu, což má za následek vznik nehomogenní struktury s anizotropními mechanickými vlastnostmi. Aby bylo možné takto vytvořené výrobky funkčně využít, je třeba zjistit jakých mechanických a jiných vlastností takto vytvořené výrobky dosahují.

Ke zjištění a analýze mechanických, strukturních a chemických vlastností materiálu lze využít celou řadu zkušebních a měřicích metod. Mnohé z těchto metod je standardizováno a jejich doporučené provádění a vyhodnocování je dáno národními či nadnárodními normami.

Obsahem této kapitoly je stručná charakteristika zkušebních a měřicích metod, kterých bude využito při studiu mechanických a strukturních vlastností ocelových výrobků vyrobených technologií 3D tisku SLM.

#### **3.1 Zkouška tahem**

Zkouška tahem je jedna z nejpoužívanějších mechanických zkoušek materiálů. Princip tahové zkoušky je založen na postupném zvyšování tahového namáhání zkušební tyče zpravidla až do jejího přetržení. Během provádění zkoušky je zaznamenáván vývoj vyvozované síly v závislosti na celkovém prodloužení. Zkouška tahem se zpravidla provádí za pokojové teploty, ale v případě potřeby se provádí i za snížených či zvýšených teplot. Zkouškou tahem se zjišťuje mez pevnosti, mez kluzu a tažnost zkoušeného materiálu. [13,14]

Zkouška tahem je normalizována a její doporučená příprava, provádění a vyhodnocování je dáno normou ČSN EN ISO 6892 část 1 až 3.

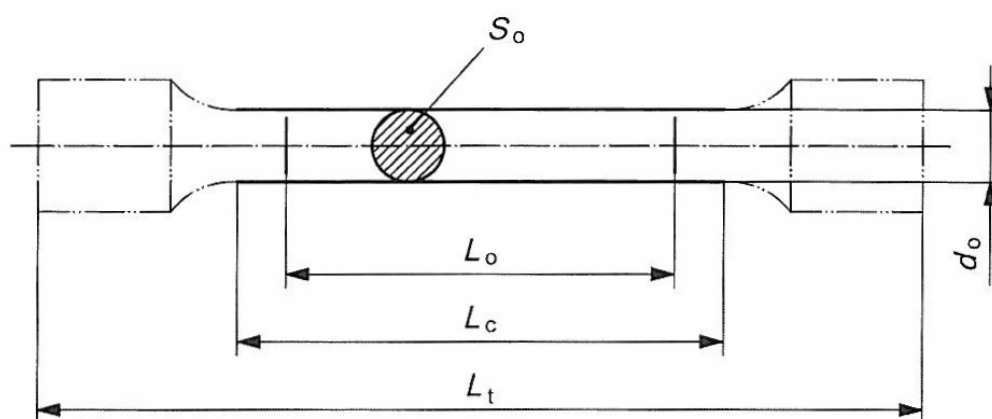
##### **3.1.1 Zkušební zařízení**

Zkušebním zařízením je trhací stroj, který bývá konstruován tak, aby na něm bylo možno po drobné modifikaci provádět i zkoušky v tlaku, ohybu či ve stříhu. Vysoké požadavky jsou kladeny především na tuhost konstrukce. U mechanických trhacích strojů bývá zatěžovací síla vyvozována i měřena mechanicky, u hydraulických strojů pak

hydraulicky. Ke snímání průtahu zkušební tyče se využívá mechanických, optických či elektrických průtahoměrů. U moderních trhacích strojů je průběh i vyhodnocování zkoušky do značné míry automatizováno. [13,14]

### 3.1.2 Zkušební těleso

Zkušebními tělesy jsou obvykle tyče či trubky normalizovaných rozměrů. Rozměry, požadavky na přesnost a způsob odběru těchto těles je dán normou. Pro odběr a opracování vzorkových těles je nutno využít technologií, které neovlivní vlastnosti těchto vzorků. Na obrázku 12 je uvedeno schéma normalizovaného tyčového zkušebního tělesa. [13,14]



#### Legenda

- $d_0$  počáteční průměr zkoušené délky kruhového zkušebního tělesa
- $L_c$  zkoušená délka
- $L_0$  počáteční měřená délka
- $L_t$  celková délka zkušebního tělesa
- $S_0$  počáteční průřezová plocha zkoušené délky

Obr. 12: Normalizované zkušební těleso kruhového průřezu [14]

## 3.2 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

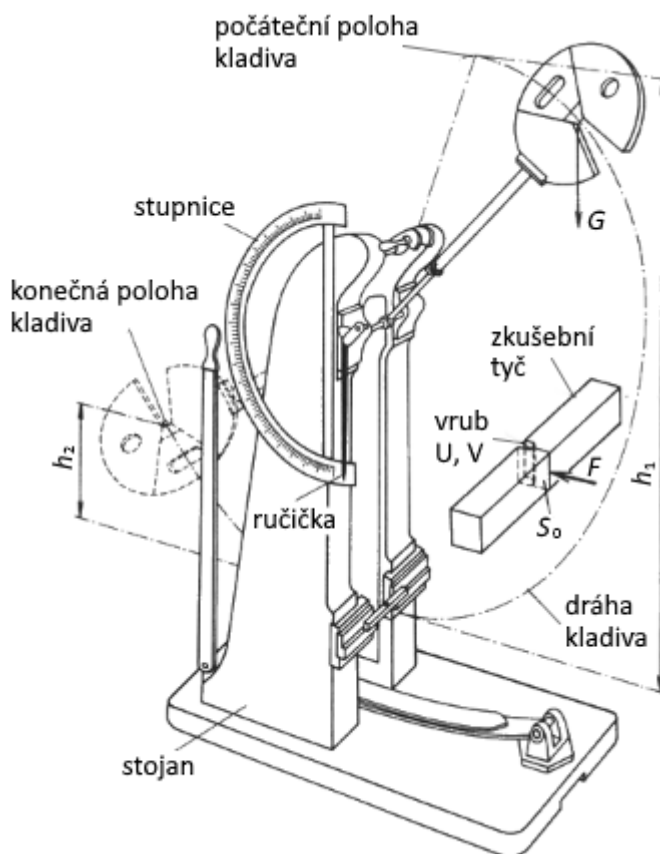
Zkouška rázem v ohybu, někdy také nazývána zkouška vrubové houževnatosti, je další z řady běžně využívaných metod zkoušení materiálu. Touto zkouškou se zjišťuje schopnosti materiálu odolávat křehkému porušení. Princip zkoušky spočívá ve vyvození rychlé deformace uvnitř zkoušeného tělesa při jeho přerážení břitem Charpy-ho kladiva. Při zkoušce se vyhodnocuje množství kinetické energie spotřebované na přerážení tělesa, a dále se sleduje poměr křehkého lomu na lomové ploše a tvar lomové plochy. Zkouška rázem v ohybu se obvykle provádí při pokojové teplotě, ale jelikož odolnost materiálů vůči

křehkému porušení značně závisí na teplotě, tak se zkoušky často provádí za snížených a někdy až kryogenních teplot. [13,15]

Zkouška rázem v ohybu je normalizována a její doporučená příprava, provádění a vyhodnocování se řídí normou ČSN EN ISO 148 část 1 až 3.

### 3.2.1 Zkušební zařízení

Schéma zkušebního zařízení je uvedeno na obrázku 13. Zkušební těleso se umísťuje do nejnižšího bodu, kterého břít dosahuje při kyvu, tedy do místa, kde má kladivo maximální kinetickou energii. V tomto místě se těleso umísťuje tak, aby při nárazu břitu kladiva došlo k rozevření vrubu. Energie spotřebovaná na přeražení tělesa se počítá jako rozdíl potenciální energie kladiva na začátku a na konci kyvu. [13]

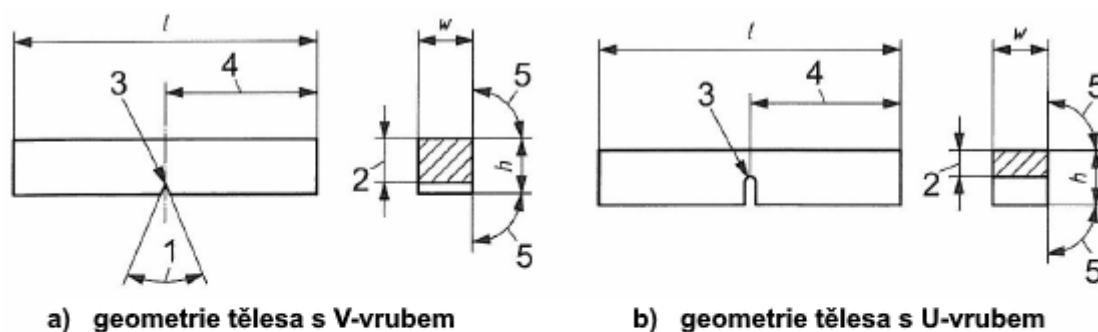


Obr. 13: Schéma Charpyho kladiva [31]

### 3.2.2 Zkušební těleso

Standartním zkušebním tělesem pro zkoušku rázem v ohybu je hranol o čtvercovém průřezu 10x10 mm a délce 55 mm s „V“ či „U“ vrubem vyrobeným uprostřed. Přesné rozměry a tolerance jsou dány normou. Způsob odběru a výroby zkušebních těles musí

zajistit zachování původních mechanických vlastností. Na obrázku 14 jsou vyobrazeny schémata standartních variant zkušebního tělesa. [13,15]



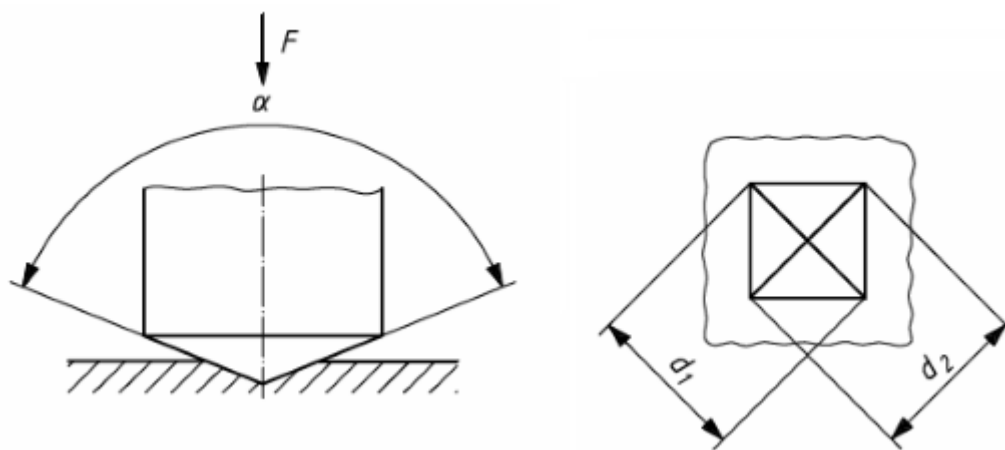
#### Legenda

$l$	Délka	3	Poloměr zakřivení kořene vrubu
$h$	Výška	4	Vzdálenost roviny symetrie vrubu od konců zkoušeného tělesa
$w$	Šířka	5	Úhel mezi přilehlými podélnými povrchy zkušebního tělesa
1	Úhel vrubu		
2	Výška pod vrubem		

Obr. 14: Schéma zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu [15]

### 3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tvrdomost je mechanická vlastnost, která je obecně charakterizována jako odpor materiálu vůči vniknutí cizího tělesa. Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vtlačování indentoru do povrchu součásti či vzorku definovanou silou po definovanou dobu a následné vyhodnocení vtisku. U zkoušky podle Vickerse je indentorem pravidelný čtyřboký diamantový jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . Po odlehčení se vyhodnocuje povrch vzniklého trvalého vtisku, přičemž se měří úhlopříčky vzniklého čtvercového obrazce, ze kterých se poté výpočtem určuje výsledná hodnota tvrdosti. Jednoduché schéma zkoušky je uvedeno na obrázku 15. [13,16]



Obr. 15: Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse [16]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je normalizována a její doporučená příprava, provádění a vyhodnocování se řídí normou ČSN EN ISO 6507 část 1 až 4.

### 3.4 Metalografie

Metalografie obecně zahrnuje metody hodnocení a posuzování struktury kovových materiálů. Metalografie se zabývá pozorováním a hodnocením celé škály strukturních elementů jako jsou například: segregace, zrna, póry, mikrotrhliny, precipitáty, vměstky atd. Některé z těchto strukturních vlastností a elementů lze pozorovat pouhým okem, ale většina z nich pro pozorování vyžaduje použití různých forem mikroskopie. Podle velikosti strukturních parametrů se tyto zpravidla dělí do následujících 3 základních skupin: [13,17]

- Makrostruktura – zahrnuje parametry a elementy do rozměru cca 100  $\mu\text{m}$ , tyto parametry a prvky lze zpravidla pozorovat pouhým okem či s mírným zvětšením. [17]
- Mikrostruktura – zahrnuje parametry a elementy v rozmezí 100  $\mu\text{m}$  až 100 nm, k pozorování v tomto rozmezí je nutno využít optických mikroskopů či forem Rtg. topografie. [17]
- nanostruktura – zahrnuje strukturní parametry a elementy v rozměrech pod 100nm, pro pozorování v této oblasti je nutné využít elektronové mikroskopie. [17]

### 3.4.1 Makrostruktura

Studie makrostruktury se zabývá těmi největšími strukturními parametry a elementy, z nichž mnoho lze pozorovat pouhým okem či s pouze mírným (maximálně 20x) zvětšením. Často se využívá výbrusů a v některých případech se pro zviditelnění struktury zkoumaný povrch leptá. Typickými makrostrukturními prvky bývají: trhliny, dutiny, póry, řediny, hrubé vměstky atd. [13,17]

### 3.4.2 Mikrostruktura

Mikrostrukturní parametry a elementy již nelze pozorovat pouhým okem a je nutné využít jiných forem pozorování. Pro studium mikrostruktury se využívá světelné a v některých případech i elektronové mikroskopie.

#### Světelná mikroskopie

Světelná mikroskopie je nejrozšířenější metoda hodnocení mikrostruktury. Princip této formy mikroskopie je založen na využití soustavy čoček a jiných optických elementů k vytvoření zvětšeného obrazu pozorovaného vzorku. Maximální dosažitelné zvětšení činí 2000x. [17]

Světelnou mikroskopii lze využít k celé řadě mikrostrukturních hodnocení, jako jsou např.: hodnocení výskytu fází, hodnocení strukturních defektů, stanovení čistoty, stanovení obsahu vměstků, stanovení velikosti zrn, kvantitativní hodnocení fází atd. [17]

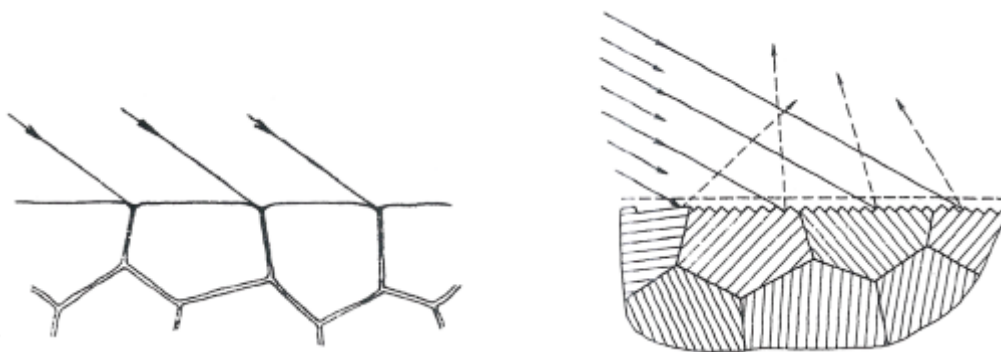
Pro účely hodnocení mikrostruktury je důležité provést důkladnou přípravu vzorků. Úkolem přípravy je nadělit vzorky požadovaných rozměrů a připravit zkoumaný povrch k analýze. Tato příprava se zpravidla skládá z následujících 4 kroků: [17]

1. Dělení – podle typu materiálu a velikosti výrobku se volí způsob dělení, nejčastěji se používá rozbrušovaček, drátových pil, řezání vodním paprskem atd. Velikosti vzorků závisí na požadavcích, ale obvykle se dělí tak, aby sledovaná plocha měla rozměry 2-4 cm<sup>2</sup>. Volené dělicí technologie nesmí tepelně ovlivnit sledovanou plochu.
2. Fixace – aby bylo možno dosáhnout požadované kvality povrchu sledované plochy je nutné nadělené vzorky před broušením zafixovat. Fixace probíhá zalitím či zalisováním do plastu či pryskyřice.

3. Broušení - pro broušení se využívá brusných papírů odstupňovaných zrnitostí. Broušení zpravidla probíhá ve specializovaných metalografických přístrojích pro broušení a leštění.
4. Leštění – leštění probíhá podobně jako broušení ve specializovaných zařízeních, přičemž se využívá leštících diamantových past. V některých případech se využívá elektrolytického leštění.

Po provedení této přípravy lze na vzorcích již pozorovat přítomnost některých strukturních prvků, jako jsou například: nekovové vměstky, póry, či přítomnost a rozsah necelistvostí. V této fázi přípravy vzorků se často provádí hodnocení makrostruktury. [17]

Dokonalé hodnocení mikrostruktury na takto připravených vzorcích není možné, jelikož mikrostruktura není zatím viditelná a je nutné ji teprve zviditelnit. Zviditelnění se nejčastěji provádí leptáním povrchu slabým roztokem kyselin. Základní principy zviditelnění jsou vysvětleny pomocí obrázků 16. Vlevo na obrázku lze vidět zviditelnění, kdy díky zvýšené koncentraci poruch dochází přednostně k leptání hranic zrn, což se při pozorování projeví stíny v oblasti hranic zrn. Vpravo lze pak vidět princip zviditelnění pomocí plošného leptání, kdy leptáním dochází ke změně odrazivosti jednotlivých zrn z důvodu jejich různých krystalografických orientací. [17]



Obr. 16: Základní principy zviditelnění leptáním, vlevo: přednostní leptání hranic zrn, vpravo: plošné leptání [13]

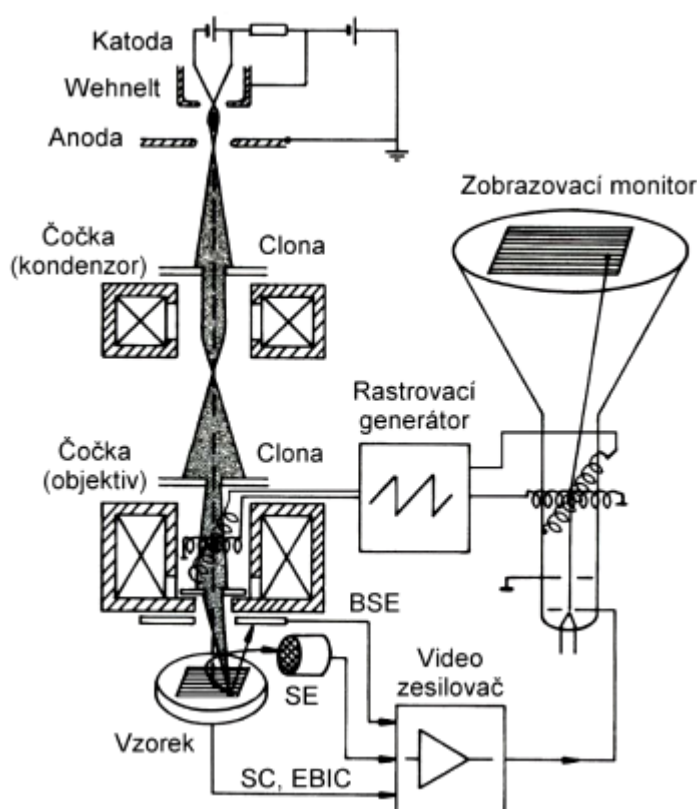
Na leptaných vzorcích již lze provádět pokročilé mikrostrukturní analýzy, jako jsou například: hodnocení výskytu fází, hodnocení strukturních defektů, stanovení čistoty, stanovení obsahu vměstků, stanovení velikosti zrn atd. [17]



## SEM řádkovací elektronová mikroskopie

Řádkovací elektronová mikroskopie je v metalografii méně rozšířená, ale značně užitečná forma mikroskopie, která se využívá v případě důkladnějšího studia materiálu. V takových případech se elektronová mikroskopie často kombinuje s „klasickou“ světelnou mikroskopií.

Princip elektronové mikroskopie spočívá v tvorbě a usměrňování elektronového paprsku a následném pozorování a vyhodnocování výsledků interakcí tohoto paprsku s povrchem zkoumaného vzorku. Interakce paprsku elektronů se vzorkem produkuje různé formy signálů, které lze využít ke zjištění informací o geometrii povrchu, globálním a lokálním chemickém složení, magnetických a elektrických vlastnostech, krystalografii vzorku atd. Na obrázku 17 je uvedeno jednoduché schéma SEM mikroskopu. [17]



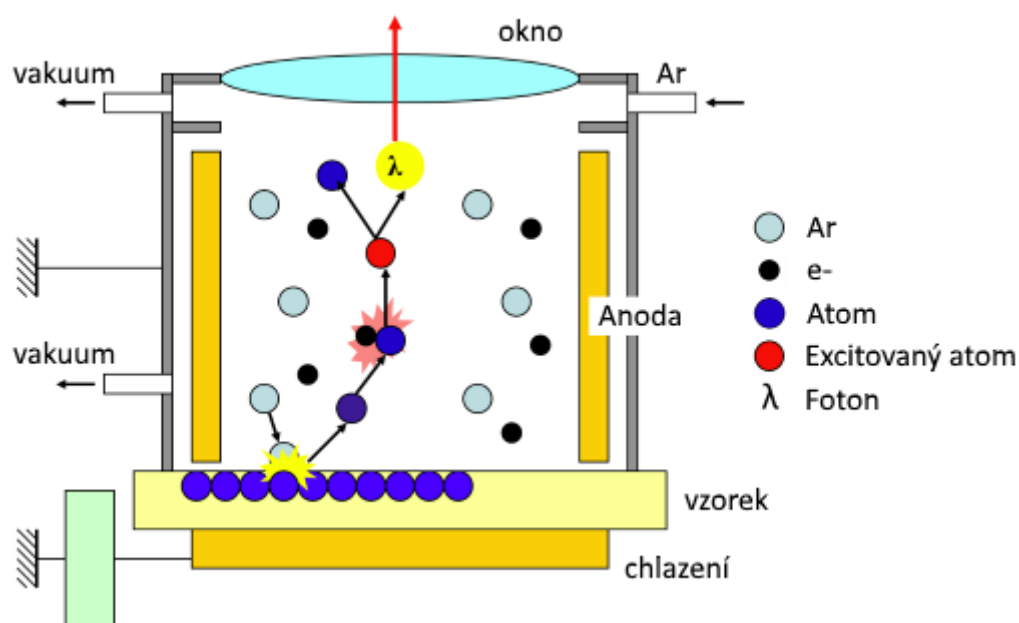
Obr. 17: schéma SEM mikroskopu [17]

Příprava vzorků pro řádkovací elektronovou mikroskopii zpravidla zahrnuje čištění zkoumaného povrchu od nečistot, často se využívá ultrazvukové čištění. Pokud je zkoumaný povrch pokryt korozí, tak se využívá chemického čištění. Důležité je, aby čištění povrchu výrazně neovlivnilo jeho geometrické a chemické vlastnosti. [17]

### 3.5 Optická emisní spektrometrie

Optická emisní spektrometrie zahrnuje moderní metody sloužící k odhalení chemického složení materiálu. Princip metody spočívá v tepelné, elektrické či světelné excitaci atomů materiálu a následném pozorování a hodnocení emitovaného elektromagnetického záření. Podle frekvencí a intenzit emitovaného záření lze zjistit přítomnost a koncentrace prvků ve zkoumaném vzorku. [18]

Metoda GD-OES - Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy, tedy optická emisní spektrometrie s doutnavým výbojem, je metoda využívající doutnavého výboje v argonové atmosféře k odprašení a excitaci atomů hodnoceného vzorku. Při odprašování dochází k úbytku materiálu vzorku a s postupem času odprašování přestupuje od povrchu do hloubky vzorku, což umožňuje sledovat a hodnotit změny v chemickém složení v různých hloubkách. Na obrázku 18 je uveden princip funkce GD-OES spektrometru. [18]



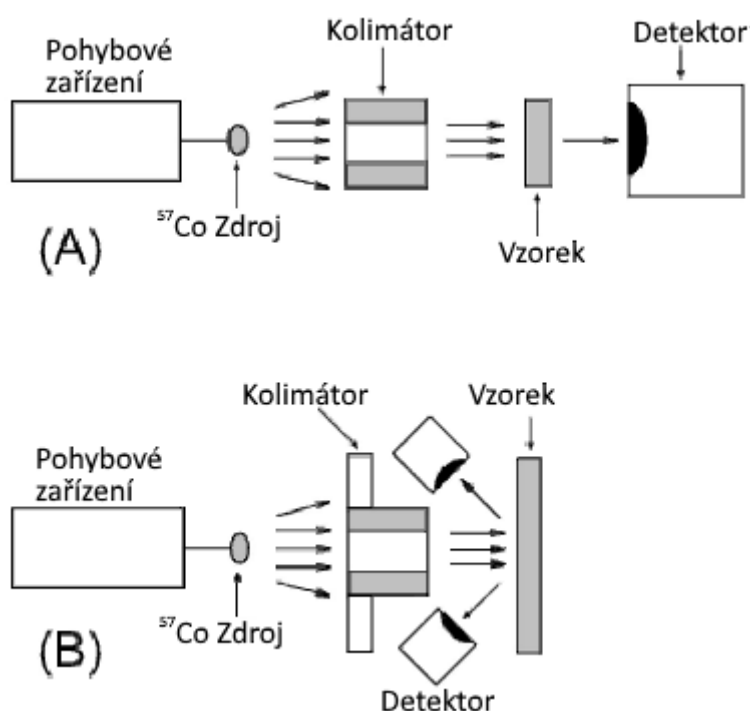
Obr. 18: Schéma funkce GD-OES spektrometru [32]

### 3.6 Mössbauerova spektroskopie

Mössbauerova spektroskopie je metoda studia fyzikálních vlastností některých materiálů včetně železa obsaženého v ocelích. Mössbauerova spektroskopie je založena na Mössbauerově efektu, což je fenomén bezdrazové rezonanční absorpce a emise  $\gamma$  záření v pevných látkách. Mössbauerův efekt je pozorován pouze u některých izotopů některých

prvků, v případě ocelí jde o stabilní isotop železa  $^{57}\text{Fe}$ , který tvoří cca 2% běžně se vyskytujícího železa. [19,20]

Princip Mössbauerovy spektroskopie spočívá v prozařování tenkého, nebo ozařování objemového vzorku pohybujícím se zdrojem  $\gamma$  záření a vyhodnocování záření prošlého či odraženého. Jako zdroje záření se využívá isotopů Kobaltu  $^{57}\text{Co}$ , které podléhají přeměně na  $^{57}\text{Fe}$  zachycením elektronu a emisí  $\gamma$  záření o energii 835.927 keV. Zdroj záření se při měření řízeně periodicky přibližuje a vzdaluje zkoumanému vzorku, což umožňuje energii emitovaného záření modifikovat pomocí Dopplerova efektu. Na obrázku 19 je uvedeno jednoduché schéma prozařovací a ozařovací formy Mössbauerovy spektroskopie. [19,21]



Obr. 19: Schéma Mössbauerových spektrometrů. A: transmisní, B: odrazový [33]

Mössbauerova spektroskopie má poměrně široké uplatnění v oblasti studia různých materiálů, kdy dokáže poskytnout informace o jejich strukturních, chemických a magnetických vlastnostech.

## 4 Návrh a výroba vzorkových těles

Úkolem této práce je na základě požadavků navrhnout vhodná vzorková tělesa pro výrobu technologií SLM a po výrobě na těchto tělesech provést dohodnuté zkoušky a měření za účelem zhodnocení a srovnání mechanických, strukturních a chemických vlastností, kterých dosahují tělesa vyrobená různými výrobními režimy.

Tento úkol vychází z požadavku výrobce, kterým bylo provedení zhodnocení a srovnání vlastností výrobků, vyrobených čtyřmi kombinacemi výkonových režimů a stupňů dokončení. Technologie výroby všech výrobků je stejná a jedná se o technologii 3D tisku SLM, stejný je i materiál, kterým je austenitická korozivzdorná ocel AISI 316L.

Zmiňovanými čtyřmi kombinacemi výkonových režimů a stupňů dokončení jsou tyto kombinace:

- 1) Výkon laseru 400W, surový stav
- 2) Výkon laseru 200W, surový stav
- 3) Výkon laseru 400W, žíháno, tryskáno
- 4) Výkon laseru 200W, žíháno, tryskáno

Aby bylo možné provést objektivní hodnocení a srovnání, tak bylo s výrobcem dohodnuto, že vyrobeny budou čtyři stejné sady vzorkových těles, přičemž každá sada bude vyrobena jednou z výše uvedených variant výroby.

Návrh jednotlivých vzorkových těles a sestavení zkušební sady jsou společně s charakteristikou materiálu a popisem výroby obsahem této kapitoly.

### 4.1 Charakteristika materiálu

Vzorková tělesa byla vyrobena z austenitické korozivzdorné oceli AISI 316L (1.4404). Tyto oceli se vyznačují vysokou houževnatostí a tažností, a dále nižší tepelnou vodivostí a vyšší teplotní roztažností, což se při výrobě svařováním/navarováním či spékáním projevuje vznikem větších termálních pnutí a z toho vyplývajících větších deformací. Z pohledu svařitelnosti jsou austenitické oceli charakteristické náchylností ke vzniku horkých trhlin, k mezikrystalové korozi a ke zkřehnutí vznikem  $\sigma$ -fáze. [22]

Surovým výrobním materiálem byla chrom-niklová austenitická korozivzdorná ocel 316L ve formě prášku. Níže jsou uvedeny varianty značení oceli, její chemické složení a orientační mechanické vlastnosti.

Označení oceli: [23,24]

- Dle ČSN 17 346
- Dle EN X2CrNiMo17-12-2
- Dle W. Nr. 1.4404
- Dle AISI 316L

Tabulka č. 1: Chemické složení prášku dle výrobce [23]

Prvek	Obsah [%]
Cr	16,5 - 18,5
Ni	10,0 - 13,0
Mo	2,0 - 2,5
Mn	≤ 2,0
Si	≤ 1,0
P	≤ 0,045
C	≤ 0,030
S	≤ 0,030

Tabulka č. 2: Orientační mechanické vlastnosti oceli AISI 316L ve stavu po rozpouštěcím žíhání [25,26]

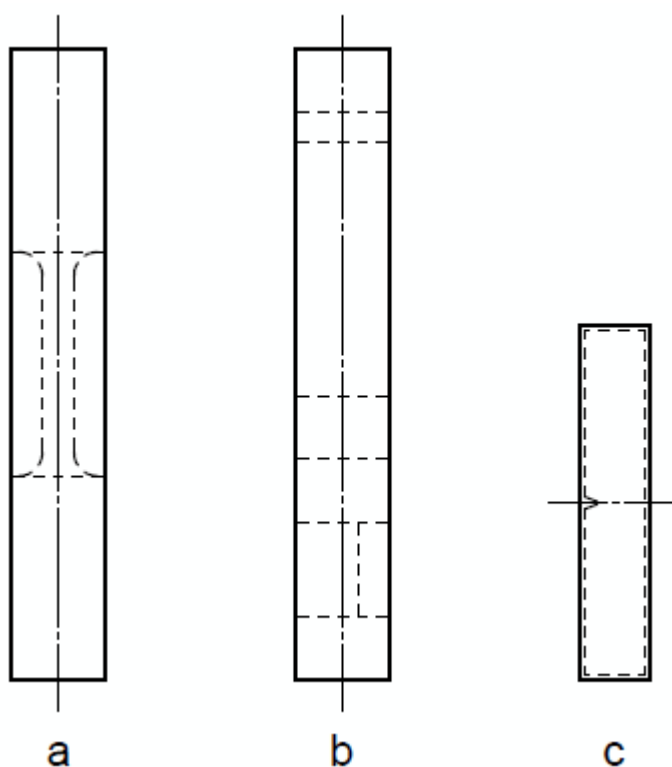
Rp0,2	Rp1,0	Rm	HB	(HV)	As min.	Z	Nárazová práce	
							20 °C	-196 °C
[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[-]	[-]	[%]	[%]	[J]	
> 190	225	520 - 670	215	226	35	63 - 68	60	60

## 4.2 Návrh vzorkových těles

Návrh tvarů, rozměrů a množství jednotlivých vzorkových těles vycházel z doporučení norem a z možností výrobního, zkušebních a měřicích zařízení. Na základě těchto možností a doporučení byly navrženy dva základní typy vzorkových těles, a to vzorkový válec a vzorkový hranol.

Vzorkový válec (obr. 20a, 20b) byl navržen jako polotovár pro výrobu zkušebního tělesa pro zkoušku tahem, či jako polotovár pro odběr menších vzorků pro metalografické hodnocení a další měření. Základní rozměry vzorkového válce vycházeli z minimálních rozměrů potřebných pro výrobu zkušebního tělesa pro zkoušku tahem a tyto rozměry byly dále navýšeny podle požadavků na rozměry vzorků pro metalografii a další měření. Výsledné rozměry vzorkového válce jsou  $\varnothing 15 \times 100$  mm.

Vzorkový hranol (obr. 20c) byl navržen čistě jako polotovár pro výrobu zkušebního tělesa pro zkoušku rázem v ohybu a z toho důvodu jeho rozměry vychází přímo z doporučení normy ČSN ISO 148-1. Rozměry vzorkového hranolu jsou  $11 \times 11 \times 56$ , což představuje rozměry standardního zkušebního tělesa ( $10 \times 10 \times 55$ ), které jsou navýšené o přírůstek na obrábění do finálního stavu.



Obr. 20: Schéma vzorkových těles a jejich účelu

Z těchto dvou typů vzorkových těles byla sestavena sada, kterou tvořilo celkem 7 vzorkových těles, a to 4 (3+1) vzorkové válce a 3 vzorkové hranoly. Volba množství jednotlivých typů vzorkových těles byla provedena následovně:

- 3x vzorkový válec pro výrobu tří zkušebních těles pro zkoušku tahem
- 1x vzorkový válec pro odběr vzorků pro metalografická a jiná měření
- 3x vzorkový hranol pro výrobu tří zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu

Množství jednotlivých typů vzorkových těles v sadě bylo zvoleno tak, aby pokrylo potřeby plánovaných zkoušek a měření.

Na základě dohody s výrobcem byla takto vytvořená sada vzorkových těles zadána k výrobě celkem čtyřikrát, vždy jedna sada pro jednu kombinaci výkonových režimů a stupňů dokončování.

### 4.3 Výroba vzorkových těles

Po navržení a sestavení byly sady vzorkových těles zadány k výrobě. Zadání výroby specifikovalo sjednaný počet sad, rozměry a množství vzorkových těles v sadě, výkonové režimy laseru pro výrobu sad, orientaci těles při tisku a požadavky na úroveň dodatečného zpracování. Ostatní výrobní parametry nebyly specifikovány a jejich volba byla ponechána na obsluhu výrobního zařízení, bylo ale zdůrazněno, aby volené parametry zůstaly stejné pro výrobu všech vzorkových těles. V tabulce č. 3 jsou uvedeny podrobnější informace o sadách těles zadáných k výrobě.

Tabulka č. 3: Zadání výroby vzorkových těles

výkon laseru	Tepelné zpracování	označení sady	typ tělesa	rozměry	množství
[W]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[ks]
400	s TZ	400-TZ	vzorkový válec	Ø15x100	4
			vzorkový hranol	11x11x56	3
	bez TZ	400-N	vzorkový válec	Ø15x100	4
			vzorkový hranol	11x11x56	3
200	s TZ	200-TZ	vzorkový válec	Ø15x100	4
			vzorkový hranol	11x11x56	3
	bez TZ	200-N	vzorkový válec	Ø15x100	4
			vzorkový hranol	11x11x56	3

Výroba sad vzorkových těles probíhala přímo u výrobce, kterým je pracoviště 3D tisku „UPrint 3D“ ve vědeckotechnickém parku Univerzity Palackého v Olomouci.

Výroba probíhala na zařízení M2 Cusing od firmy Concept Laser (obr. 21). Toto zařízení slouží ke 3D tisku z kovových prášků metodou SLM. Jako zdroje laserového paprsku se využívá Ytterbiového vláknového laseru o výkonu až 400W. Jako ochranné atmosféry se využívá dusíku, který prochází přes pracovní prostor a zajišťuje také odfuk spalin.



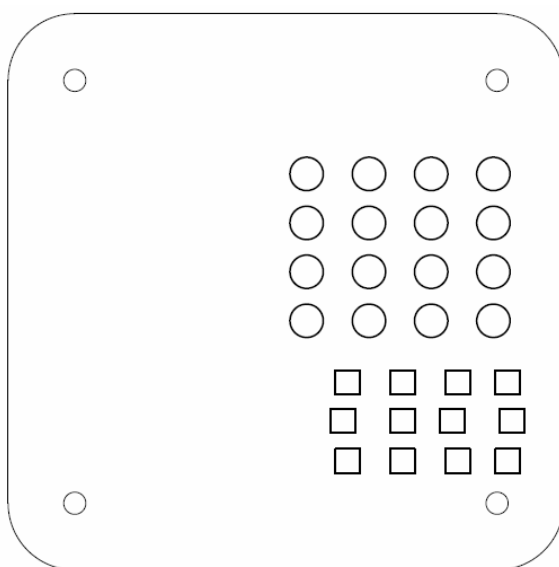
Obr. 21: Výrobní zařízení M2 Cusing [34]

Výroba všech sad vzorkových těles probíhala najednou, přičemž souběžná výroba 400W a 200W sad byla zajištěna automatickým přepínáním režimu laseru během výrobního procesu. Všechna tělesa byla tisknuta na podpěrách. V tabulce č. 4 jsou uvedeny základní výrobní parametry a na obrázku 22 je uvedeno schéma přibližného rozmístění těles na základní desce.



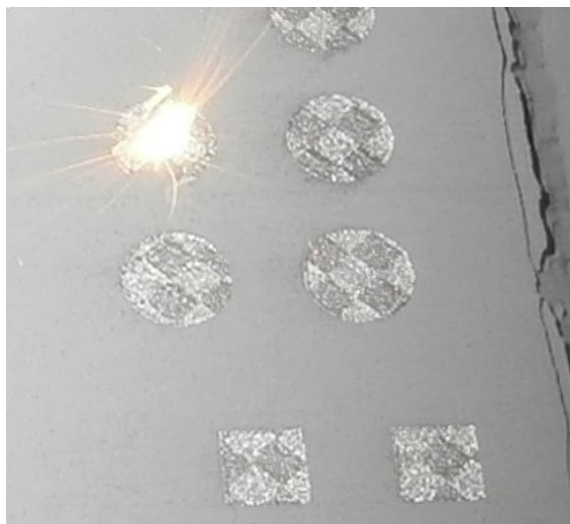
Tabulka č. 4: Vybrané výrobní parametry

výkonové režimy		"200W"	"400W"	
tloušťka vrstvy		45		[μm]
šířka stopy		150		[μm]
strategie skenování		šachovnice		[-]
podpěry	výkon	180	130	[W]
	rychlost	1200	1000	[mm/s]
plocha	výkon	<b>200</b>	<b>400</b>	[W]
	rychlost	<b>1200</b>	<b>1800</b>	[mm/s]
kontura	výkon	200	200	[W]
	rychlost	1440	1600	[mm/s]
doba výroby (celkem)		25		[h]

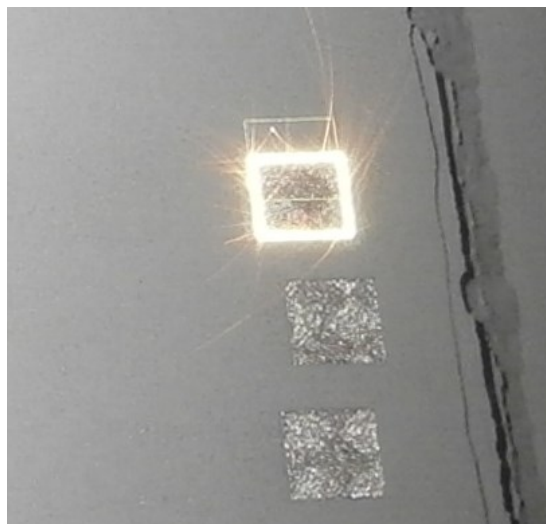


Obr. 22: Schéma přibližného rozložení těles na základní desce

Proces tisku probíhal tak, že nejprve byly nižším výkonem vytvořeny podpěry, na kterých měla tělesa stát. Po dokončení těchto podpěr započal tisk samotných těles, který poté již beze změny pokračoval až do konce celého procesu. Každá vrstva těles vznikla vytvořením kontury a výplně, přičemž parametry laseru pro tvorbu kontur a výplní se lišily. Pro tvorbu výplní byla využita šachovnicová strategie skenování laserovým paprskem, což mělo za následek vznik šachovnicové textury plochy vytvořené vrstvy, jak je možné vidět na obrázcích 23 a 24.



Obr. 24: Tvorba výplně vrstvy  
vzorkového válce



Obr. 23: Tvorba kontury vrstvy  
vzorkového hranolu

Na počátku tisku těles se vyskytnul problém u dvou vzorkových válců vyráběných výkonem laseru 400W, tímto problémem byla deformace (zvedání) již vytištěné části (spodního konce) těles jak je možné vidět na obrázku 25. Tento problém se naštěstí s dalšími vrstvami nezhoršoval a přibývajících vrstvy materiálu vzniklou nerovnost vykompenzovaly a všechny výrobky byly nakonec vyrobeny v pořádku. Tato deformace spodního konce těles byla pravděpodobně způsobena termálním pnutím, které bylo tak vysoké, že přetrhlo podpěry, což umožnilo „zvednutí“ čerstvě vytištěného materiálu. Potrhané podpěry byly objeveny až při odkrytí hotových těles. Na obrázku 26 je ukázán detail zdeformovaného spodního konce jednoho ze vzorkových válců.



Obr. 25: Deformace „zvedání“ spodních vrstev  
dvojice vzorkových válců



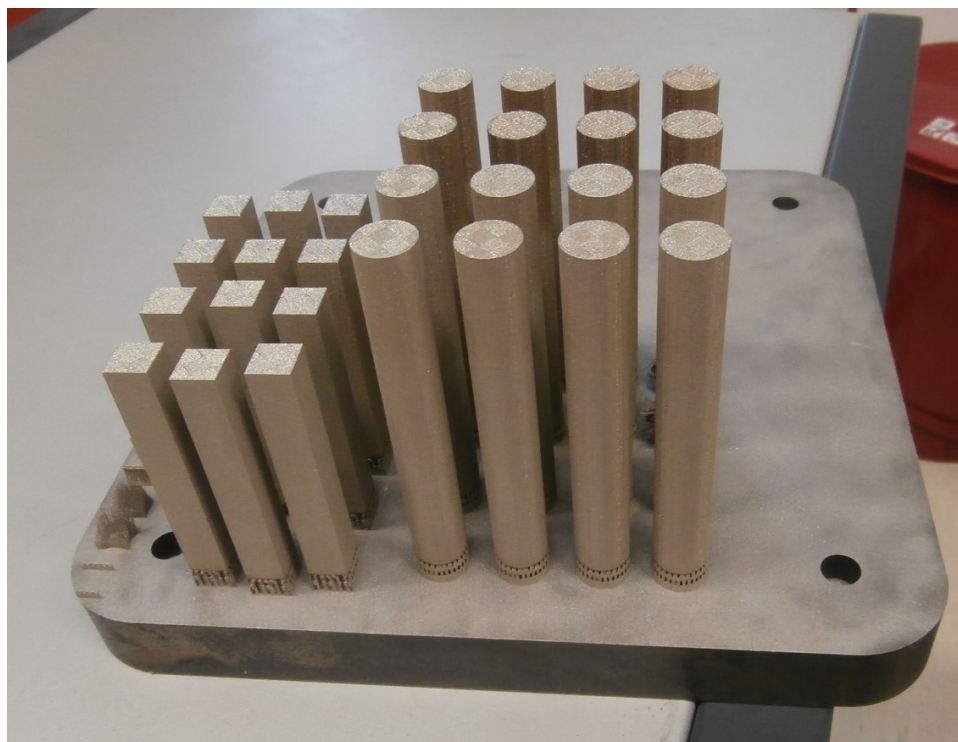
Obr. 26: Výsledná  
zdeformovaná část jednoho z  
válců

Po dokončení tisku a odkrytí těles bylo zjištěno, že u válcových těles je horní cca 1/4 odlišně zbarvena. Toto odlišné zbarvení je výrazné u těles vyrobených 400W, jak je možné vidět na obrázku 27, u těles vyrobených 200W je tato změna stěží pozorovatelná. Ke změně zbarvení došlo u všech těles ve stejné výšce, a to nápadně ve výšce, ve které byl dokončen tisk vzorkových hranolů. Tato změna zbarvení byla pravděpodobně způsobena zvýšením střední teploty tisknutých těles, což byl následek zkrácení délky cyklů tisku, ke kterému došlo po dokončení výroby vzorkových hranolů.



Obr. 27: Změna zbarvení horní části jednoho ze vzorkových válců

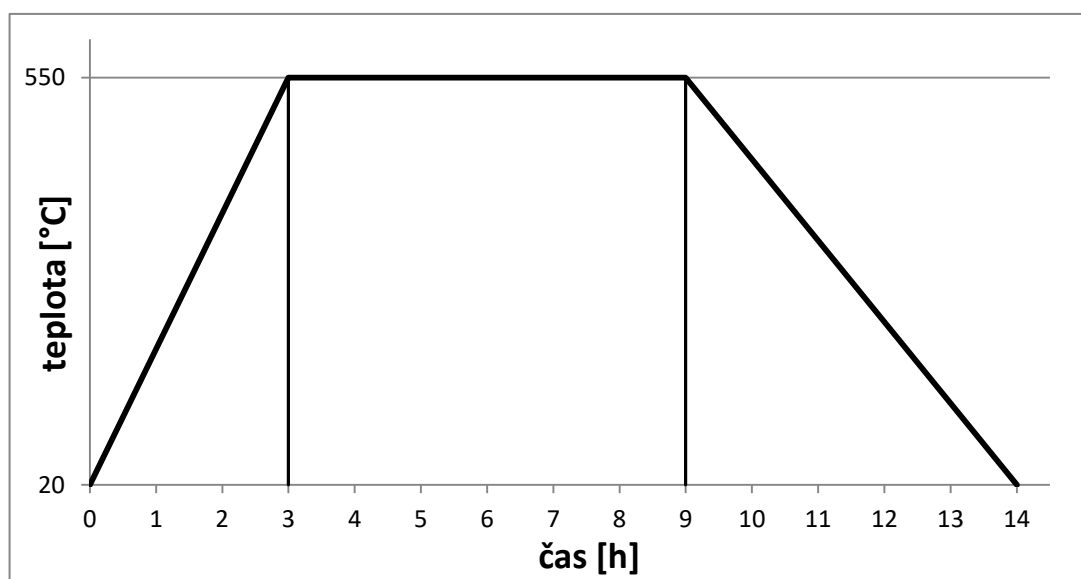
Po dokončení výroby a odstranění nevyužitého prášku byla základní deska s napojenými výrobky vyjmuta ze zařízení (obr 28) a následně z ní byly odstraněny sady těles 400-N a 200-N, které byly dále očištěny od zbytků podpěr a uloženy do označených krabiček.



Obr. 28: Vzorková tělesa bezprostředně po dokončení tisku

Zbylé dvě sady těles (400-TZ a 200-TZ) byly poté společně se základní deskou tepelně zpracovány žíháním ke snížení vnitřních pnutí. Žíhání probíhalo v elektrické žíhací peci při teplotě 550°C po dobu 6 hodin dle teplotní křivky uvedené v grafu č. 1.

Graf č. 1: Režim tepelného zpracování



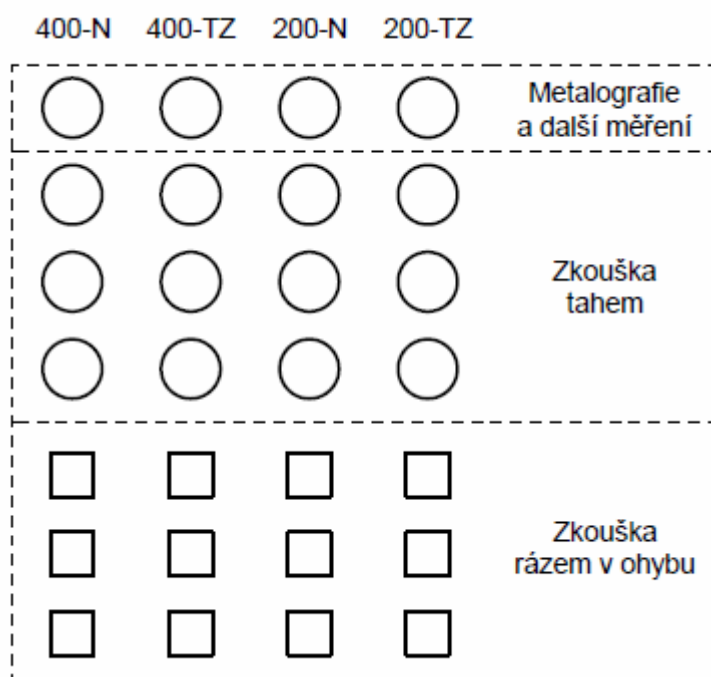
Po tepelném zpracování byly obě sady těles odděleny od základní desky a jednotlivá tělesa byla dále očištěna hrubým a jemným tryskáním. Podobně jako předtím u „nezpracovaných“ sad (400-N a 200-N), i zde byly sady očištěných těles uloženy do označených krabiček.

Navzdory problémům s deformacemi byla všechna vzorková tělesa vyrobena ve vyhovující kvalitě.

## 5 Zkoušky a měření

### 5.1 Rozdělení těles a odběr vzorků

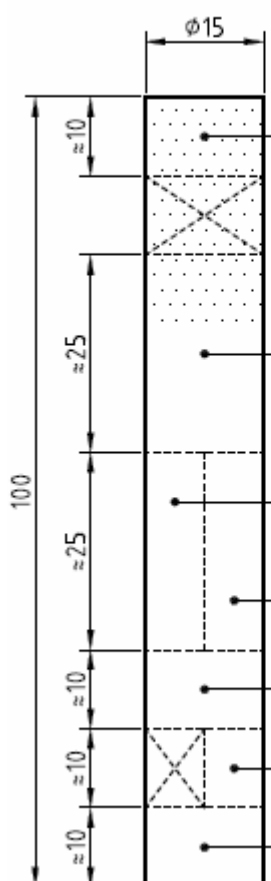
Vyrobená vzorková tělesa byla podle účelu rozdělena do tří skupin, jak je uvedeno na obrázku 29. Toto rozdělení bylo provedeno v souladu s plánem vytvořeným při návrhu vzorkových těles (viz podkapitola 4.2).



Obr. 29: Rozdělení vzorkových těles pro zkoušky a měření

Vzorková tělesa určená pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu byla zadána přímo k výrobě zkušebních těles. Výroba těchto zkušebních těles bude popsána dále v podkapitolách příslušných zkoušek.

Vzorková tělesa určená pro metalografii a další měření posloužila k odběru menších vzorků pro potřeby metalografie, SEM mikroskopie, měření tvrdosti, GD-OES a Mössbauerovy spektroskopie. Parametry odebíraných vzorků vycházely z požadavků příslušných měření. Na obrázku 30 je uvedeno schéma odběru vzorků společně s informacemi o účelu a značení těchto vzorků.

		400-N	400-TZ	200-N	200-TZ
Účel vzorků		Označení vzorků			
	Metalografie, SEM	42N	42TZ	21N	21TZ
	Mössbauerova spektroskopie	45N	45TZ	25N	25TZ
	Mössbauerova spektroskopie	44NB	44TZB	24NB	24TZB
	Mössbauerova spektroskopie	44NA	44TZA	24NA	24TZA
	GD-OES, Tvrdost	43N	43TZ	23N	23TZ
	Metalografie	41N	41TZ	22N	22TZ
	Metalografie	41N	41TZ	22N	22TZ

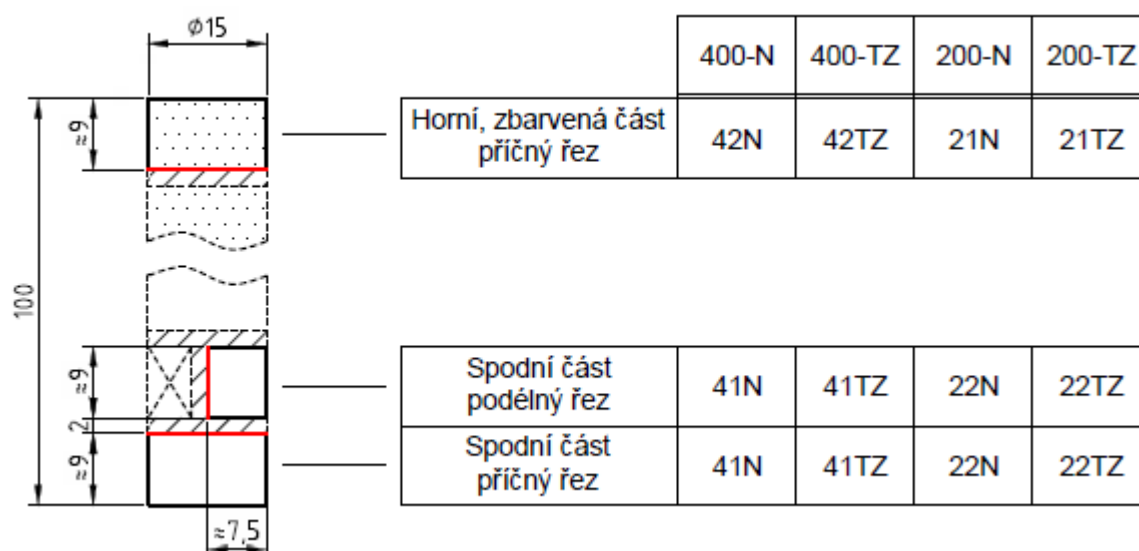
Obr. 30: Dělení, účel a označení vzorků (tečkovaná oblast představuje zabarvenou část těles, viz podkapitola 4.3)

Aby nedošlo k ovlivnění materiálu, byl odběr vzorků proveden vodou chlazeným mechanickým dělením. Šířka řezu činila 2 mm.

Případné podrobnější informace o odběru a přípravě vzorků jsou uvedeny dále v podkapitolách věnujících se příslušným měřením.

## 5.2 Metalografie

Pro účely metalografického hodnocení byly z každého vybraného tělesa odebrány celkem 3 vzorky a to dva příčné a jeden podélný. Jeden příčný vzorek byl vždy odebrán ze spodní části tělesa, zatímco druhý byl vždy odebrán z horní „zbarvené“ části tělesa. Podélný vzorek byl vždy odebrán ze spodní části. Upřesněné schéma odběru vzorků pro metalografii je společně s dalšími informacemi uvedeno na obrázku 31.



Obr. 31: Upřesněné schéma odběru vzorků, červeně je označena zkoumaná plocha

Důvodem k odběru a hodnocení příčných vzorků z obou konců vzorkových těles bylo podezření, že v horní zbarvené části těles by se některé strukturní vlastnosti mohly lišit od vlastností ve zbytku těles.

Odebrané vzorky byly zafixovány zalitím do elektricky vodivé pryskyřice „condufast“ (akrylová pryskyřice s železným práškem). Vodivá pryskyřice byla zvolena proto, aby se po provedení metalografických měření mohly vzorky dále využít pro GD-OES či SEM mikroskopii.

Po zafixování vzorků v pryskyřici příprava pokračovala postupným broušením a leštěním. K broušení bylo využito brusných kotoučů. K leštění vzorků bylo využito diamantových leštících past o různých zrnitostech a pro konečné chemické leštění bylo využito leštící suspenze na bázi oxidu hlinitého.

Na vyleštěných vzorcích bylo poté provedeno hodnocení makrostruktury.

### 5.2.1 Hodnocení makrostruktury

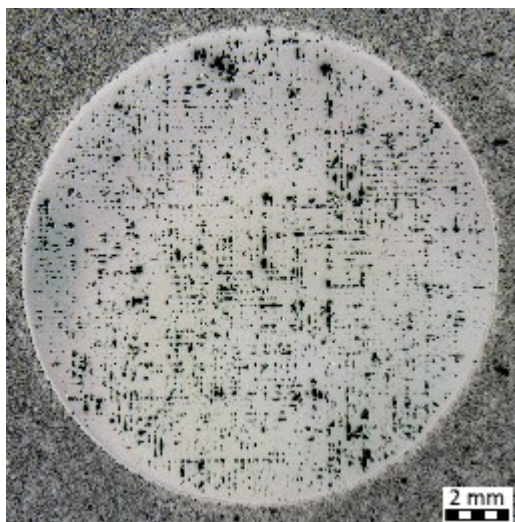
Hodnocení makrostruktury vzorků bylo prováděno pomocí stereomikroskopu Olympus SZX7 (obr. 32).



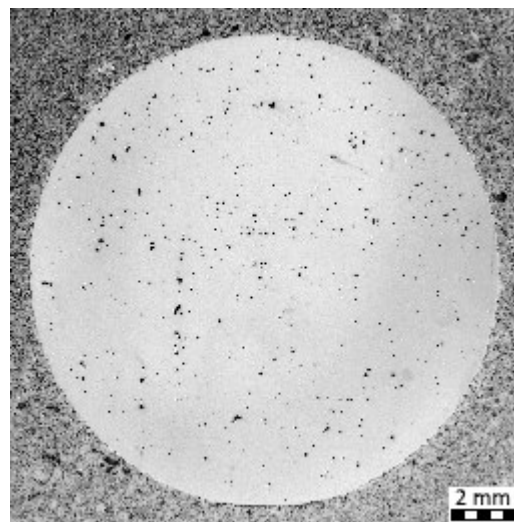


Obr. 32: Stereomikroskop Olympus SZX7

Při hodnocení makrostruktury byl u všech vyleštěných vzorků pozorován výskyt pórů. U všech vzorků pocházejících z těles vyrobených výkonem 200W byla vizuálně zjištěna mnohem vyšší pórovitost než u vzorků z těles vyrobených 400W. Rozdíl v pórovitosti je možné vidět na obrázcích 33 a 34 níže.



Obr. 33: Pórovitost na leštěném  
příčném řezu vzorku 22N



Obr. 34: Pórovitost na leštěném  
příčném řezu vzorku 41N

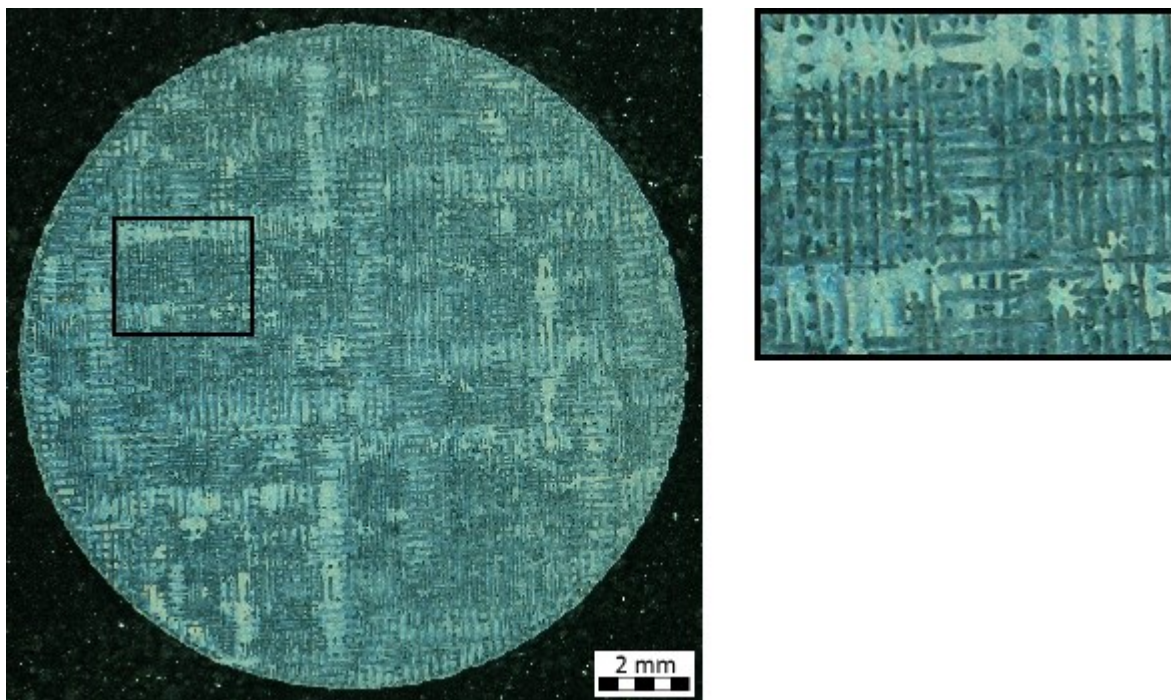
Na příčných i podélných řezech všech vysokoporézních „200W“ vzorků byla pozorována určitá pravidelnost v přednostním výskytu pórů. Na příčných řezech umístění pórů naznačuje vzor čtvercové sítě (viz obr. 33), zatímco na podélných řezech výskyt pórů naznačuje přímky či pásy rovnoběžné s osou těles (viz obr. 35). U „400W“ vzorků bylo díky značně nižší pórovitosti možné pozorovat pouze náznaky podobné pravidelnosti.



Obr. 35: Pórovitost na leštěném podélném řezu vzorku 22TZ

Po provedení a zdokumentování vizuálního hodnocení vyleštěných vzorků byly za účelem zviditelnění mikrostruktury vyleštěné vzorky leptány ve 4% roztoku kyseliny chromové  $\text{H}_2\text{CrO}_4$ .

Leptané vzorky byly poté opět podrobeny vizuálnímu makrostrukturnímu hodnocení. Při hodnocení byla na všech leptaných příčných řezech pozorována relativně pravidelná textura připomínající tkaninu. Na obrázku 36 je uveden příklad této textury u příčného vzorku 42TZ.

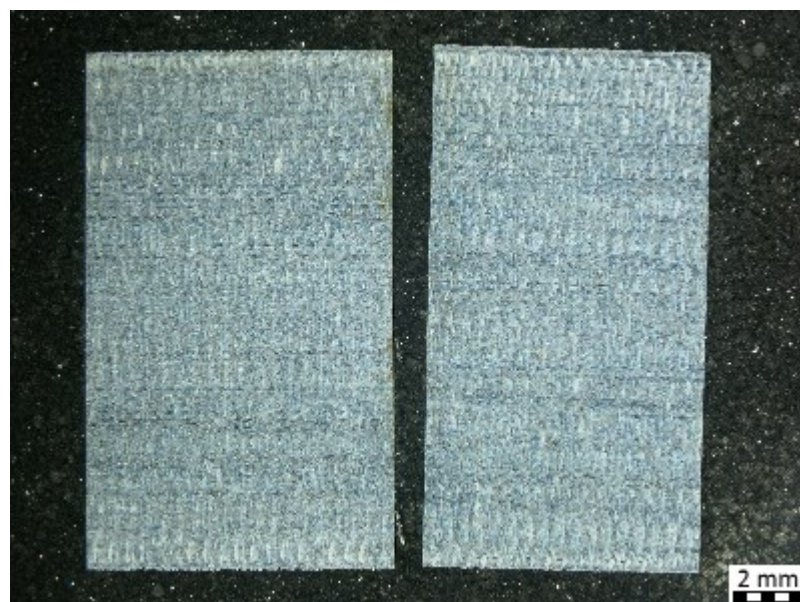


Obr. 36: Makrostruktura leptaného povrchu příčného řezu vzorku 42TZ

Jak je zřejmé z obrázku 36, textura je tvořena množstvím relativně stejně velkých kruhových až oválných útvarů, a množstvím relativně stejně širokých a různě dlouhých čar vyskytujících se ve dvou na sebe kolmých směrech. Tyto texturní prvky jsou leptáním zviditelněné svarové stopy (svarové housenky). Pravidelnost textury (a tedy pravidelnost svarových stop) do jisté míry vysvětluje pravidelnost ve výskytu pórů.

Na leptaných podélných řezech byl pozorován pouze lehký náznak opakování vrstev ve směru osy tělesa, viz obrázek 37.





Obr. 37: Makrostruktura leptaných povrchů podélných řezů. Vlevo: vzorek 4N, vpravo: vzorek 4TZ

Po provedení a zdokumentování vizuálního hodnocení makrostruktury bylo na snímcích leštěných vzorků provedeno plošné hodnocení pórovitosti. K hodnocení pórovitosti bylo využito vyhodnocovacího nástroje softwaru QuickPhoto Industrial 3.1. Princip hodnocení spočíval v měření celkové plochy pórů a v určení procentuálního podílu celkové plochy pórů na celkové ploše vzorku. Výsledky hodnocení pórovitosti jsou uvedeny v tabulkách č.5, 6 a 7.

Tabulka č. 5: Výsledky hodnocení pórovitosti

		400-N		400-TZ		200-N		200-TZ	
Horní zbarvená část	příčný řez	42N	0.39%	42TZ	0.42%	21N	4.66%	21TZ	3.55%
Spodní "základní" část	podélný řez	41N	0.82%	41TZ	0.58%	22N	5.34%	22TZ	5.96%
	příčný řez	41N	0.87%	41TZ	0.76%	22N	6.09%	22TZ	6.17%

Tabulka č. 6: Srovnání pórovitosti mezi 400W a 200W vzorky

nezpracované					tepelně zpracované				
400-N		Procentuální rozdíl	200-N		400-TZ		Procentuální rozdíl	200-TZ	
42N	0.39%	1094.87%	4.66%	21N	42TZ	0.42%	745.24%	3.55%	21TZ
41N	0.82%	551.22%	5.34%	22N	41TZ	0.58%	927.59%	5.96%	22TZ
41N	0.87%	600.00%	6.09%	22N	41TZ	0.76%	711.84%	6.17%	22TZ

Výsledky plošného hodnocení pórovitosti ukazují, že u všech 200W vzorků se vyskytuje několikanásobně vyšší pórovitost, než u 400W vzorků. Průměrná hodnota plošné pórovitosti u 200W vzorků je o 772% vyšší než u 400W vzorků. Vyšší hodnota pórovitosti u 200W vzorků byla pravděpodobně způsobena nižší mírou přetavení materiálu způsobenou nižším výkonem laseru.

Tabulka č. 7: Rozdíl v pórovitosti mezi vzorky odebranými ze „základní“ části a horní zbarvené části vzorkových válců

sada	Spodní "základní" část příčný řez		Procentuální rozdíl	Horní zbarvená část příčný řez	
400-N	41N	0.87%	-55.17%	0.39%	42N
400-TZ	41TZ	0.76%	-44.74%	0.42%	42TZ
200-N	22N	6.09%	-23.48%	4.66%	21N
200-TZ	22TZ	6.17%	-42.46%	3.55%	21TZ
průměrná hodnota			-41.46%		

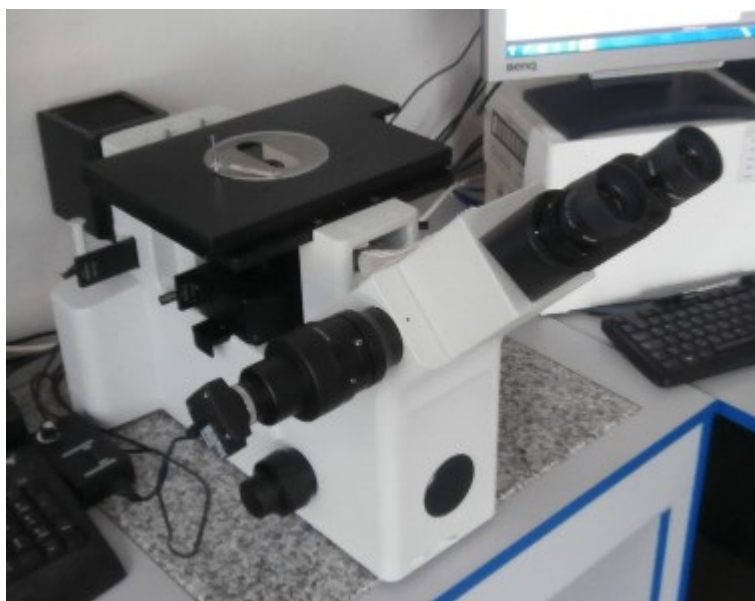
Jak je zřejmé z tabulky č. 7, u všech vzorků odebraných z horní zbarvené části těles byla naměřena prokazatelně nižší pórovitost než u vzorků odebraných z dolní „základní“ části těles. Pórovitost v horní zbarvené části těles je v průměru o 41,46% nižší než v části spodní.

Naměřenou nižší pórovitost v horní zbarvené části těles lze vysvětlit pomocí hypotézy o změně zbarvení jako následku nárůstu střední teploty těles (viz kapitola 4.3). Vysvětlení spočívá v tom, že nárůst střední teploty těles by měl také za následek nárůst míry

přetavování materiálu při tvorbě vrstev. Tento nárůst míry přetavování by vedl ke zlepšení propojení svarových vrstev a ke snížení počtu a/nebo rozsahu ložisek plynů a nepřetaveného prášku, což by vysvětlovalo pozorovaný pokles pórovitosti v této části těles.

### 5.2.2 Hodnocení mikrostruktury

Hodnocení mikrostruktury bylo provedeno na leptaných vzorcích. K hodnocení byl využit inverzní metalografický mikroskop Olympus GX51 (obr. 38).



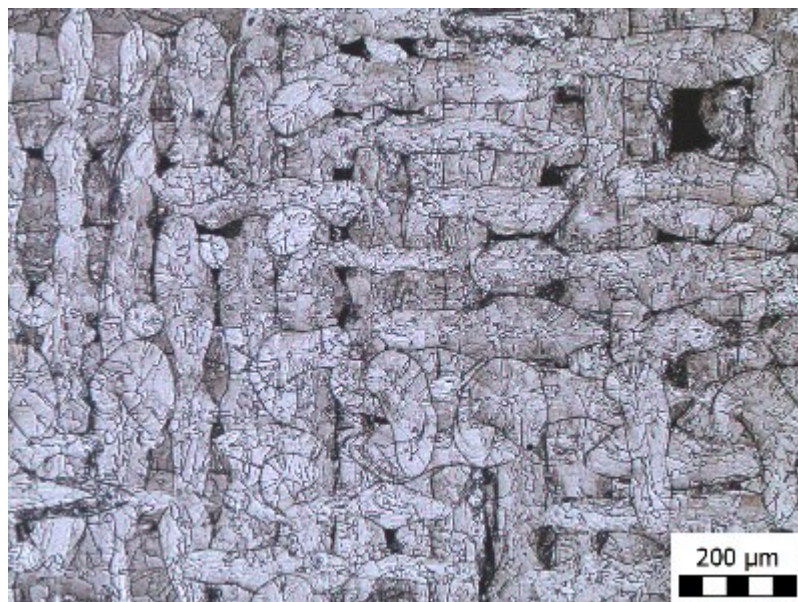
Obr. 38: Metalografický mikroskop Olympus GX51

Leptáním vzorků došlo nejen ke zviditelnění mikrostrukturních materiálních aspektů, ale také ke zviditelnění jednotlivých svarových vrstev a textur, které tyto svarové vrstvy vytváří.

#### Hodnocení textury vrstev

##### Textura „tkaniny“

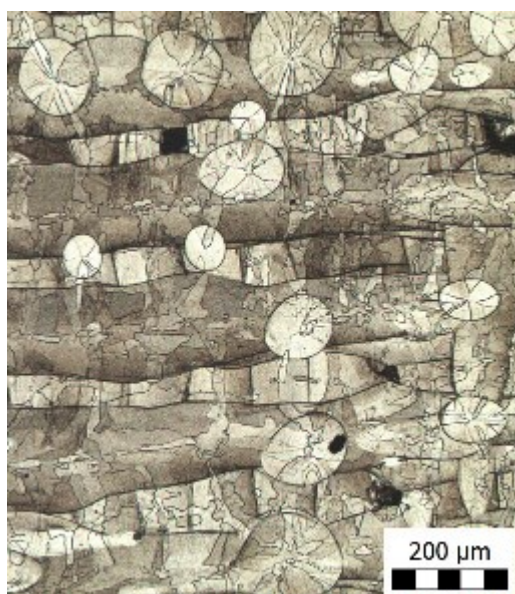
Na všech příčných vzorcích se vyskytují svarové vrstvy v na sebe relativně kolmých směrech, čímž vzniká dříve zmíněná tkaninu připomínající textura (viz. Obr. 39). Tohoto křížování svarových vrstev bylo dosaženo střídavou změnou směru svařování (natavování) při tvorbě jednotlivých vrstev tělesa, kdy směr svařování vytvářené vrstvy byl kolmý na směr svařování vrstvy předešlé.



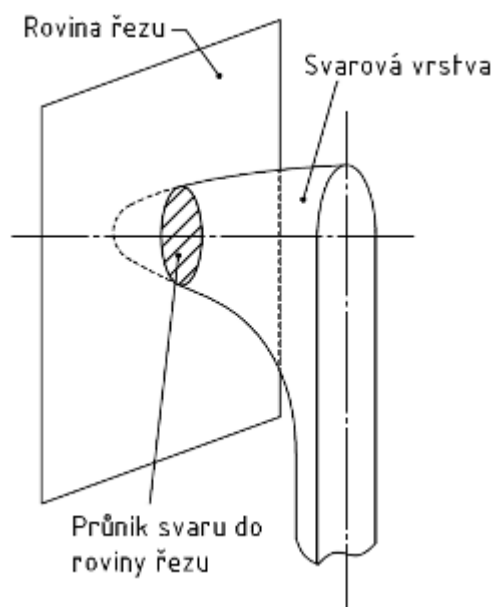
Obr. 39: Příčný vzorek 2N, textura připomínající texturu

### Kruhové a oválné útvary

V některých částech příčných vzorků se dále vyskytují kruhové či nepravidelně oválné řezy svarových stop (svarových housenek), jak je možné vidět na obr. 40. Tyto útvary jsou pravděpodobně výsledkem lokálního přetavení (provaření) vzniklého svařováním (natahováním) ve výše položené vrstvě, jak je uvedeno na obrázku 41.



Obr. 40: Příčný vzorek 42N, oválné řezy svarových vrstev

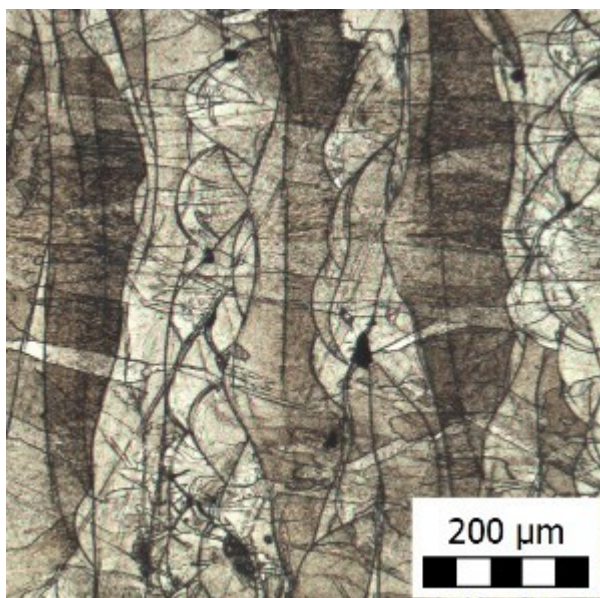


Obr. 41: Schéma vzniku oválných řezů svarových vrstev



### Vrstvená textura na podélných řezech

Na některých podélných vzorcích je možné rozpoznat vrstvenou texturu tvořenou rovnoběžnými a na osu tělesa kolmými vrstvami svarových vrstev (viz. obr. 42). Tato vrstvená struktura je výsledek postupného svařování/navarování jednotlivých vrstev tělesa při výrobě.

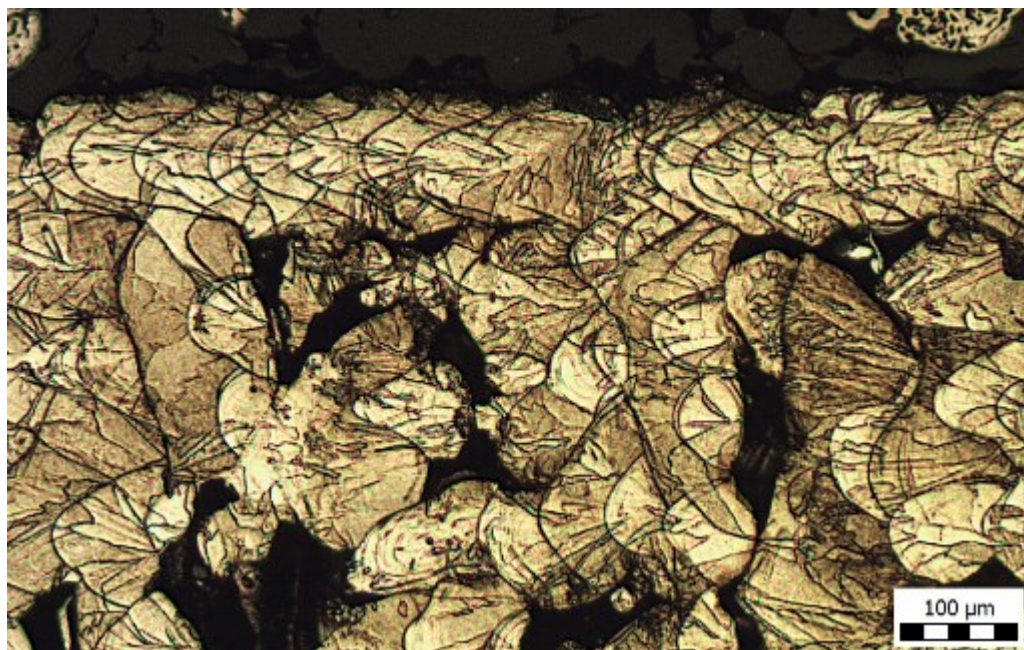


Obr. 42: Podélný vzorek 41N, vrstvená struktura

### Textura kontur těles

Na podélných vzorcích je možné v oblasti povrchu těles vidět řady svarových vrstev, které tvoří konturu tělesa. Na obrázku 43 je zřetelně vidět textura kontury vzorku v kontrastu s texturou vnitřku tělesa a porézním ložiskem.

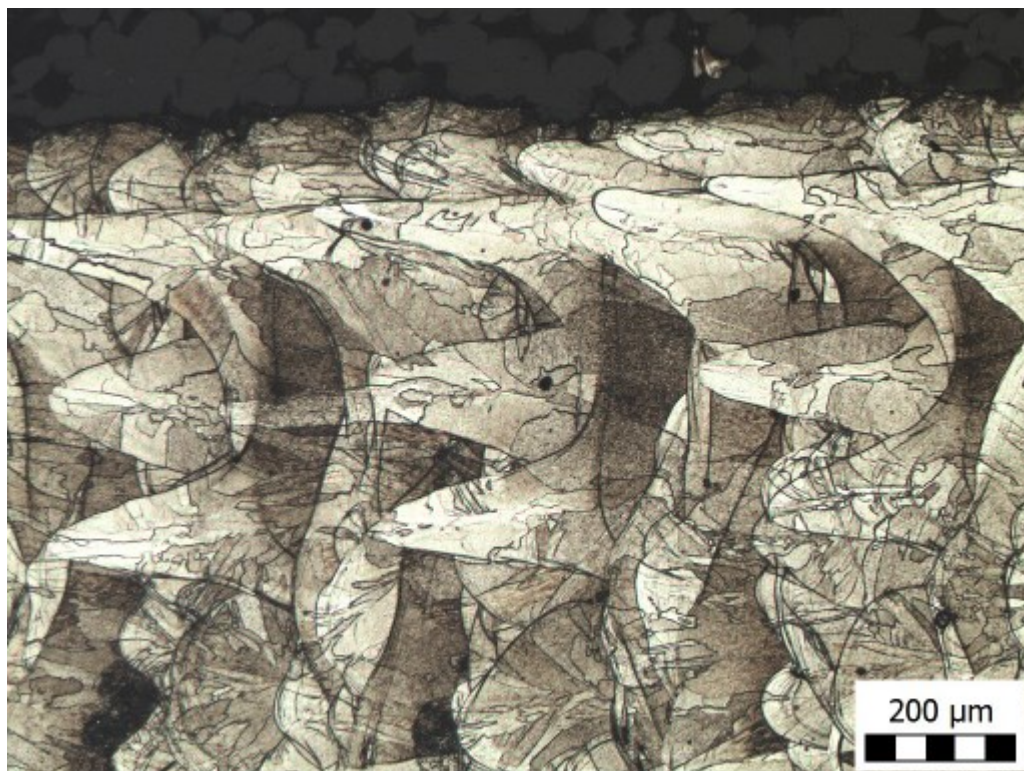




Obr. 43: Podélný vzorek 22N, svarové vrstvy tvořící konturu

#### Zjevné opakování textury

Na podélných vzorcích je dále možné pozorovat určité pravidelné opakování textury ve směru osy tělesa, vždy ve vzdálenosti cca 450  $\mu\text{m}$ , tedy cca 10 vrstev. Toto opakování bylo pravděpodobně způsobeno cyklickými posuvy šachovnicového skenovacího vzoru při výrobě. Během každého cyklu posuvů se skenovací vzor postupně posouval s každou vrstvou o jeden krok, což vedlo ke vzniku řady texturně posunutých a na podélném řezu se lišících vrstev. Pozorované opakování textury pak vzniklo opakováním tohoto cyklu posuvů, kdy během každého cyklu vznikla texturně podobná řada vrstev. Příklad pozorovaného opakování textury je možné vidět na obrázku 44.



Obr. 44: Podélný vzorek 41TZ, opakování textury

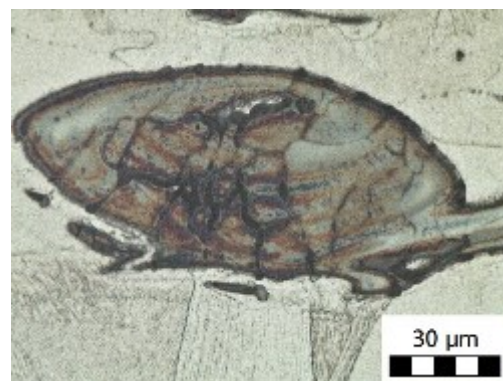
### **Hodnocení struktury**

#### Výskyt fází

U všech vzorků byla pozorována austenitická lící struktura s drobným podílem blíž neidentifikovaných fází. Výskyt fází byl odvozen z přítomnosti otisků, které byly zanechány po odleptání fází při leptání, jak je možné vidět na obrázcích 45 a 46.



Obr. 46: Příčný vzorek 42N, stopy po odleptaných fázích



Obr. 45: Příčný vzorek 42TZ, detail stopy po odleptané fázi

#### Svarová licí struktura

Na všech příčných řezech lze ve svarových stopách (svarových housenkách) pozorovat typickou svarovou krystalizační strukturu tvořenou většími protáhlými zrny orientovanými délkou kolmo k ose svaru a drobnými homogenněji tvarovanými zrny vyskytujícími se kolem osy svaru. Na všech řezech je dále možné pozorovat austenitická zrna prorůstat i přes několik svarových vrstev. Příklad licí struktury s prorostlými zrny je uvede na obrázku 47.





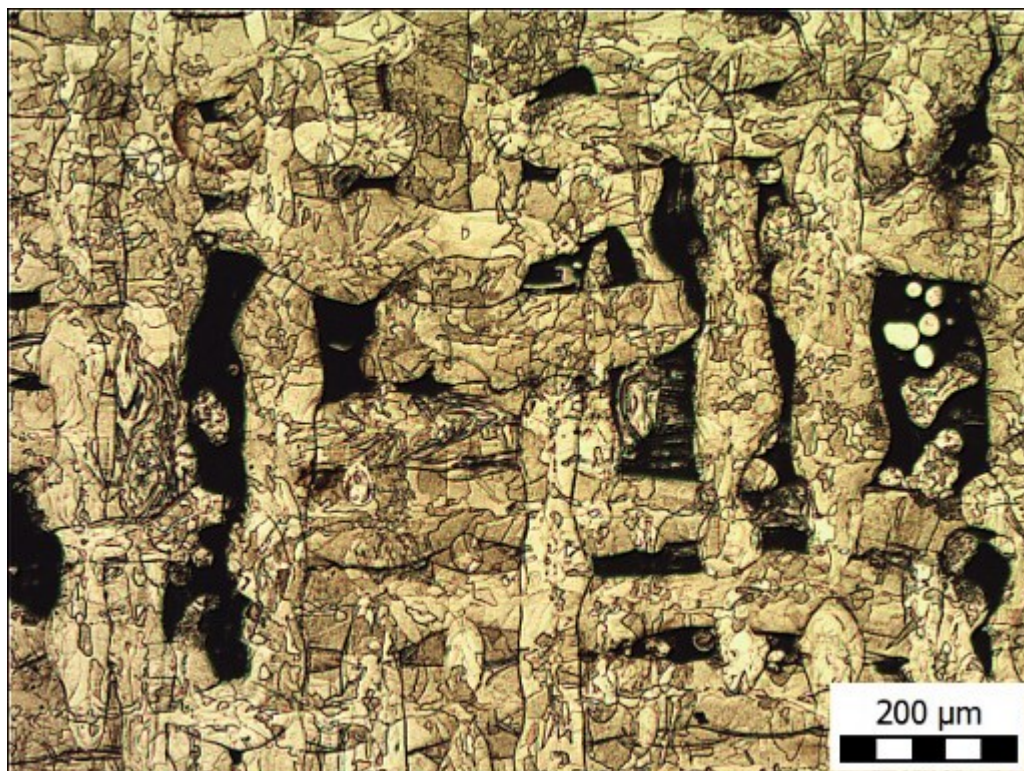
Obr. 47: Příčný vzorek 41N, svarová lící struktura

#### Pórovitost

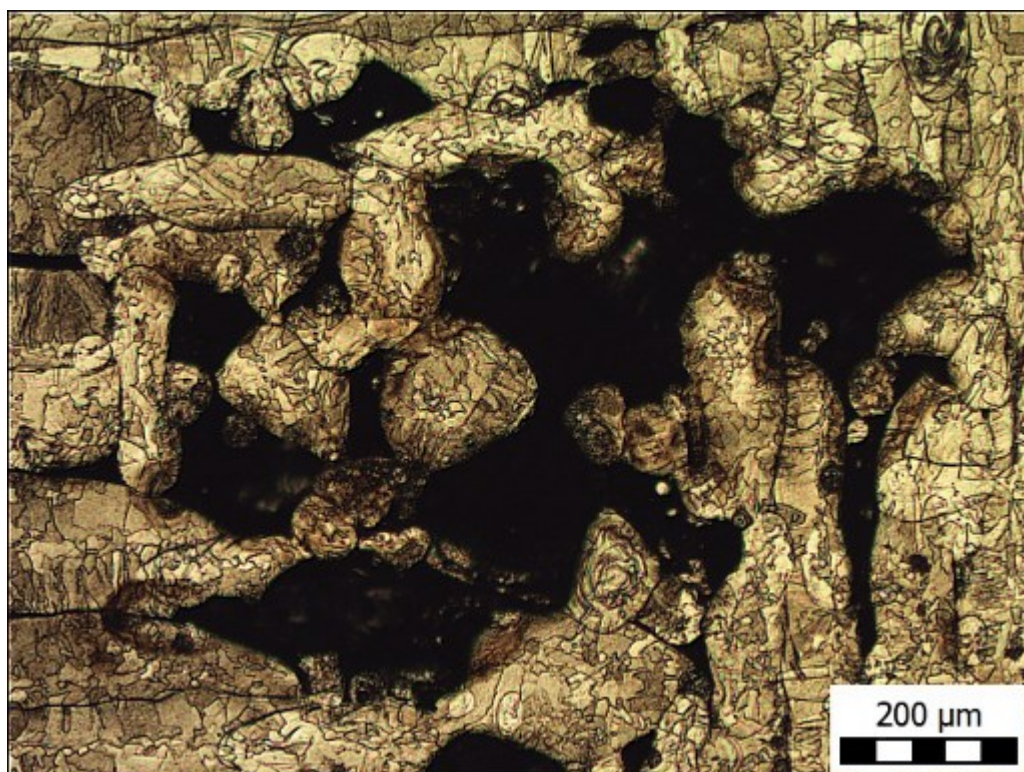
Výskyt pórů byl u všech vzorků pozorován převážně v mezi-svarových oblastech, což je nejvíce zřejmé u všech „200W“ vzorků, kde se v některých místech příčných i podélných řezů svarové vrstvy jeví až oddělené pórovitostí. V některých místech vzorků póry vytváří porézní shluky o velikosti až několik set mikrometrů. Příklady pozorované pórovitosti je možné vidět na obrázcích 48 a 49.

Umístění a tvar těchto pozorovaných pórů odpovídá tzv. procesem indukované pórovitosti způsobené nedostatečným přetavením kovového prášku. K nedostatečnému natavení mohlo dojít z důvodu nevhodně zvolených parametrů procesu, jako jsou např.: nedostatečný výkon skenovacího paprsku, nadměrná rozteč svarových stop, nadměrná tloušťka vrstev apod.





Obr. 48: Příčný vzorek 22N, mezi-svarová pórovitost



Obr. 49: Příčný vzorek 22N, porézní shluk



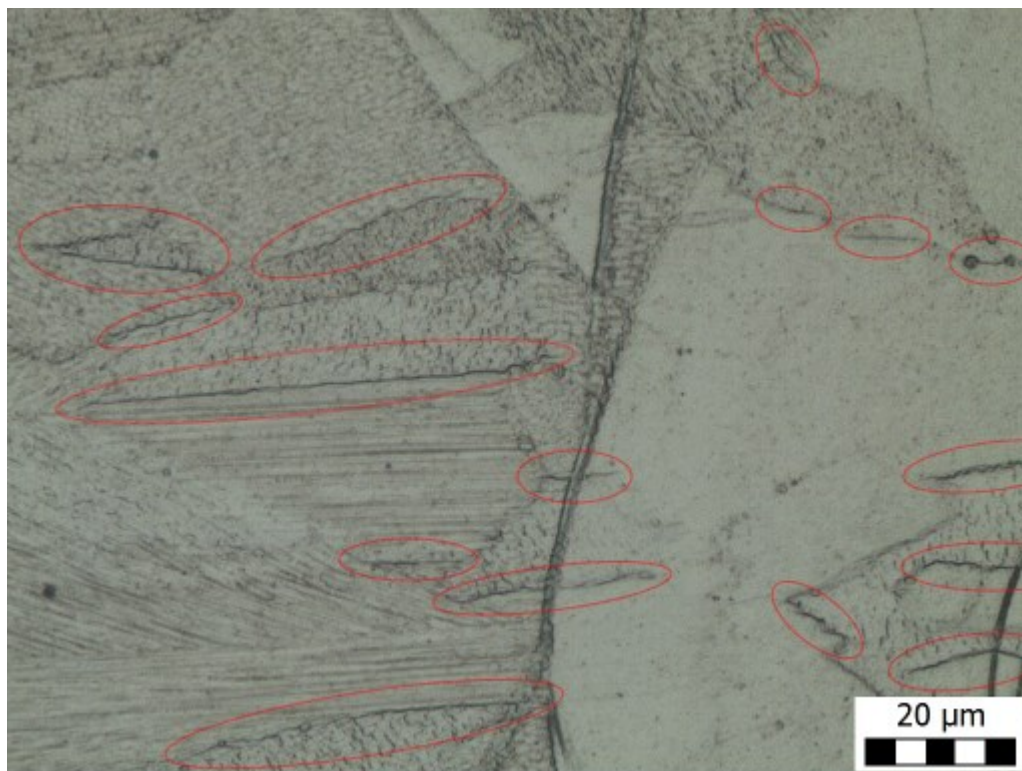
Kromě pórů vyskytujících se v mezi-svarových oblastech byl u vzorků pozorován i drobný výskyt relativně sférických pórů uvnitř kruhových řezů svarových vrstev, jak je možné vidět na obrázku 50. Tento typ pórů taktéž odpovídá tzv. procesně indukované pórovitosti, ale vzhledem k tvaru a umístění těchto pórů se v tomto případě pravděpodobně jedná o póry vzniklé uvězněním plynu na dně svarové vrstvy při uzavření tzv. klíčové dírky.



Obr. 50: Příčný vzorek 42N, póry uvnitř svarových vrstev

### Mikrotrhliny

Při mikrostrukturním hodnocení byla u všech vzorků dále odhalena přítomnost převážně interkrystalických mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny byly identifikovány jako teplé trhliny a jejich výskyt byl ve větší míře pozorován u vzorků odebraných z „400W“ těles. Příklad pozorovaného výskytu mikrotrhlin je uveden na obrázku 51.

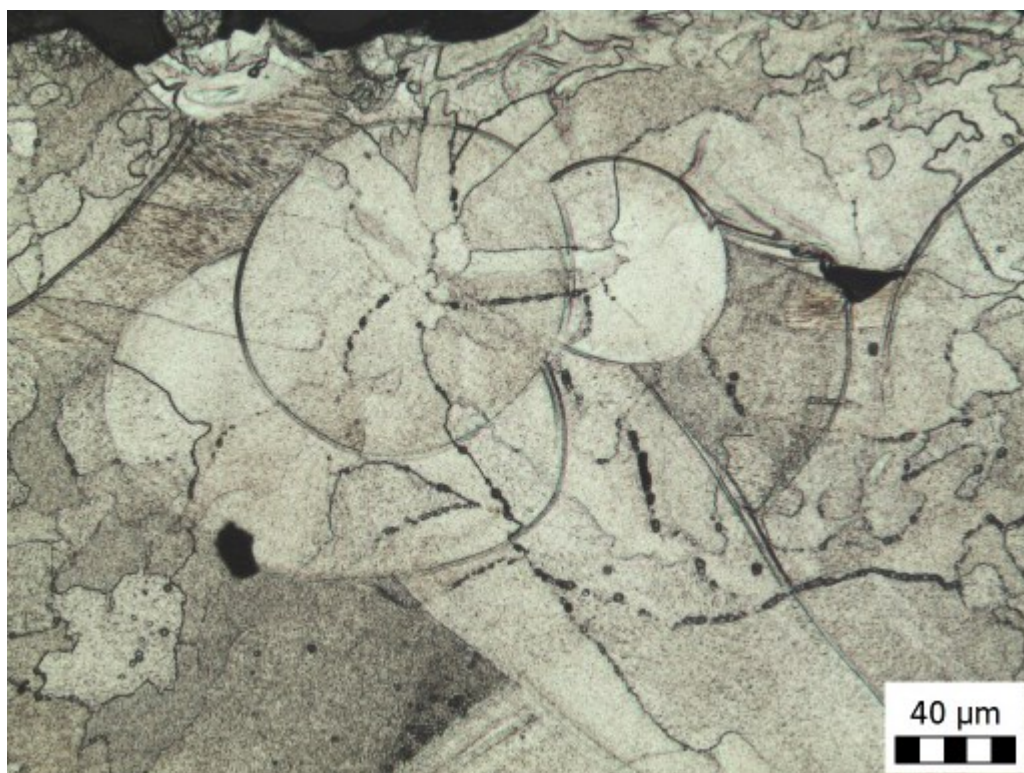


Obr. 51: Podélný vzorek 41TZ, interkrystalické mikrotrhliny

#### Částice na hranicích zrn

Na všech vzorcích byly na hranicích zrn také pozorovány možné stopy po odleptaných vyprecipitovaných částicích. Tyto stopy na řezech vypadají jako 1-3  $\mu\text{m}$  velké oválné útvary a jejich hustý výskyt se může jevit až jako provazce kopírující hranici zrn. Tyto stopy jsou v mnoha případech propojeny výše zmíněnými mikrotrhlinami, což naznačuje, že odleptané částice na hranicích zrn mohli působit jako koncentrátoři napětí. Příklad těchto stop je možné vidět na obrázku 52 a na obrázku 53 je pak možné vidět detail stop propojených mikrotrhlinou.





Obr. 52: Příčný vzorek 41N, stopy po odleptaných částicích na hranicích zrn



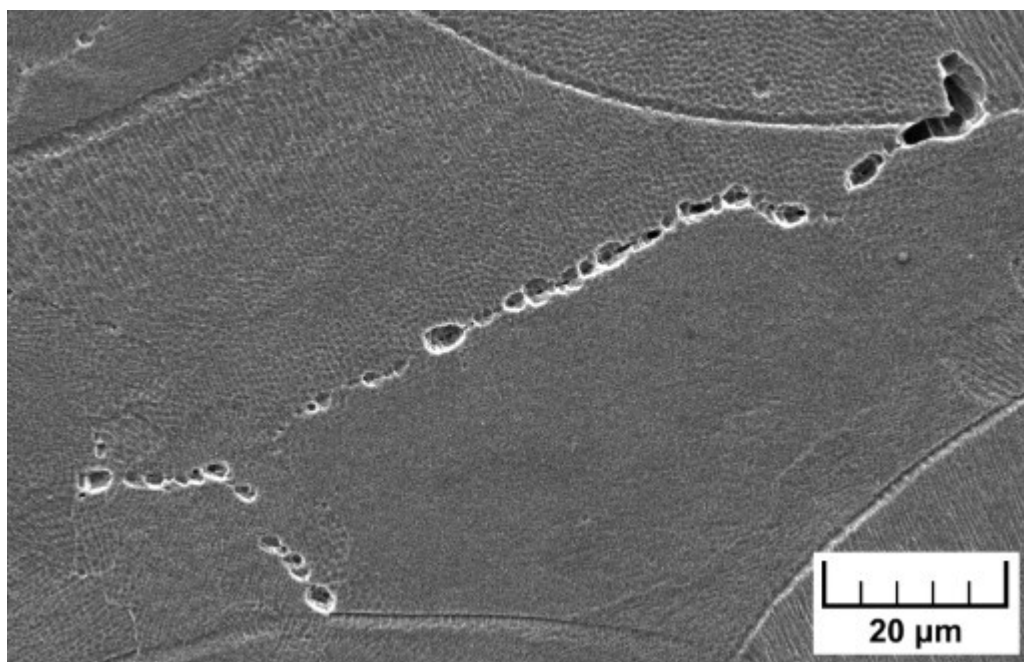
Obr. 53: Příčný vzorek 41N, detail stop po odleptaných částicích propojených mikrotrhlinou



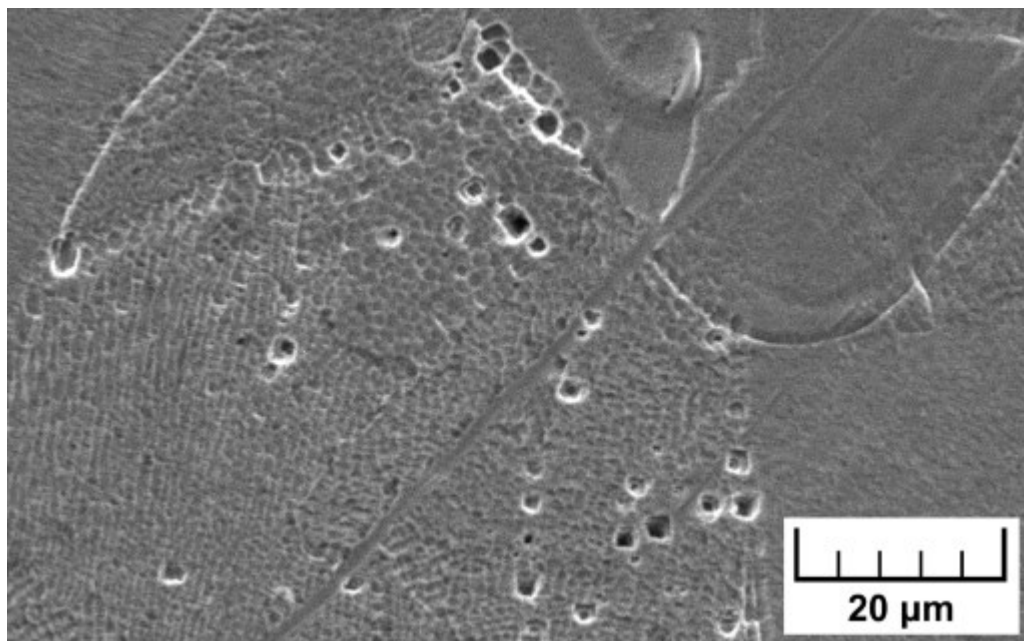
### 5.2.3 Doplnkové mikrostrukturní hodnocení SEM elektronovou mikroskopií

Doplňkové mikrostrukturní hodnocení bylo provedeno pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu VEGA3. Předmětem hodnocení byly leptané plochy metalografických vzorků 42TZ a 21TZ.

Při hodnocení povrchu byl u obou vzorků pozorován výskyt důlků na hranicích zrn, tyto důlky odpovídají stopám po odleptaných vyprecipitovaných částicích, pozorovaných optickou mikroskopií při mikrostrukturním hodnocení. Příklady zaznamenaných důlků jsou uvedeny na obrázcích 54 a 55.



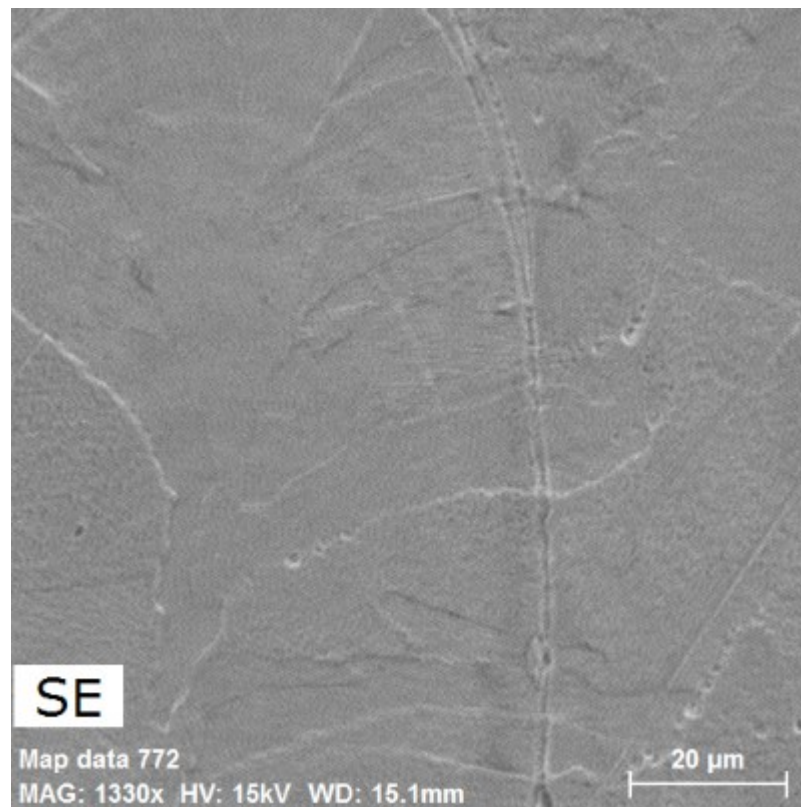
Obr. 54: SEM příčný vzorek 42TZ, detail důlků



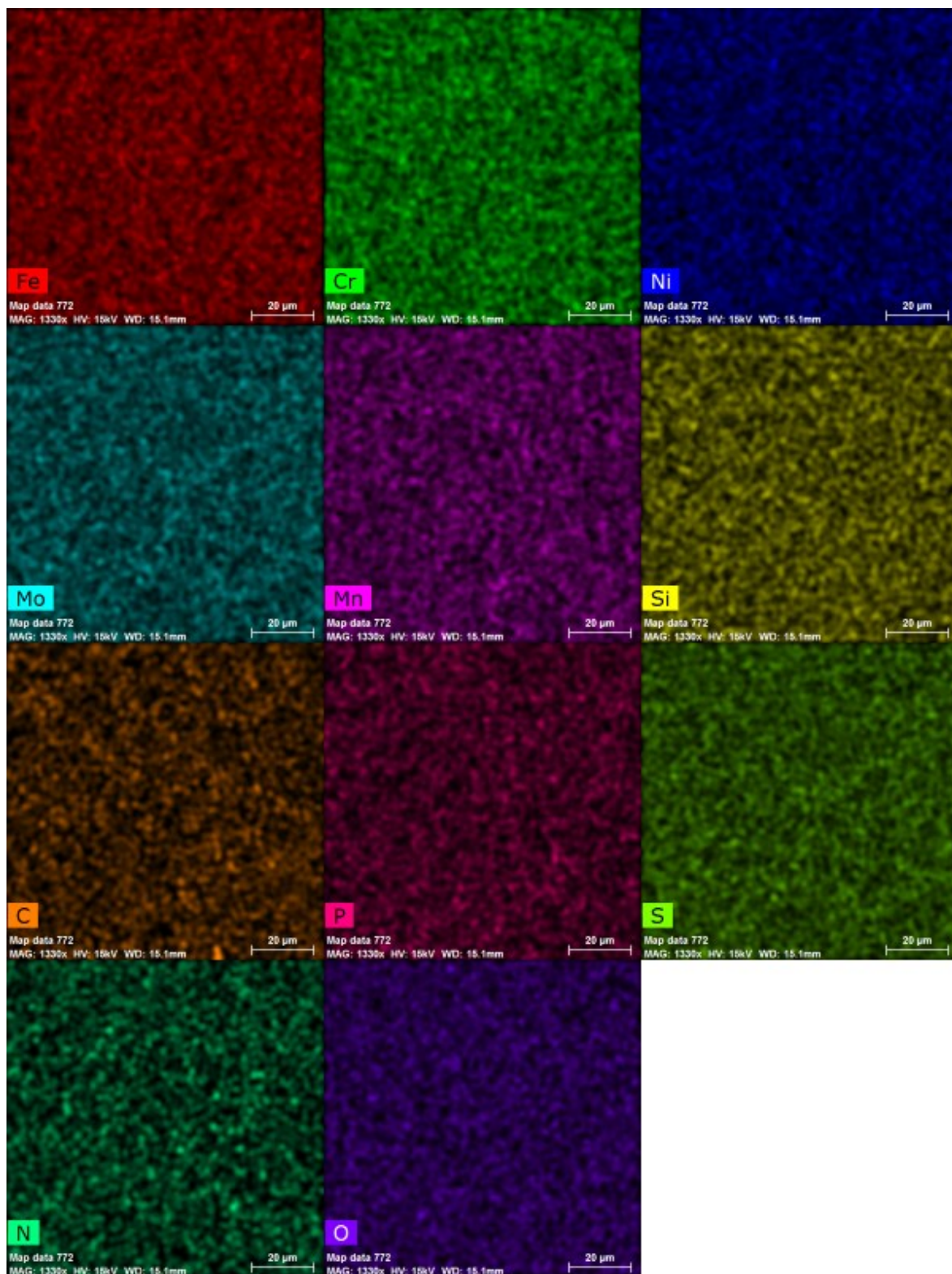
Obr. 55: SEM příčný vzorek 21TZ, detail důlků

Za účelem posouzení chemické homogenity zrn byl na plochách obou metalografických vzorků proveden prvkový mapping, a liniová analýza. Prvkový mapping byl proveden na plochách obsahujících vždy několik zrn, u obou vzorků se jednalo o plochy o velikosti cca 100x100 μm. Liniová analýza byla provedena na úsečce procházející přes plochy a rozhraní zrn. Prvkovým mappingem i liniovou analýzou byly sledovány koncentrace prvků: Fe, Cr, Ni, Mo, Mn, Si, C, P, S, N a O.

Prvkový mapping ukázal u obou vzorků homogenní rozložení všech pozorovaných prvků, bez žádných oblastí s průkazně rozdílnými koncentracemi. Na obrázcích 56 a 57 jsou uvedeny snímky z prvkového mappingu vzorku 21TZ. Na obrázku 56 je uveden snímek plochy, na které byl mapping proveden, a na obrázku 57 jsou pak uvedeny jednotlivé prvkové mapy.



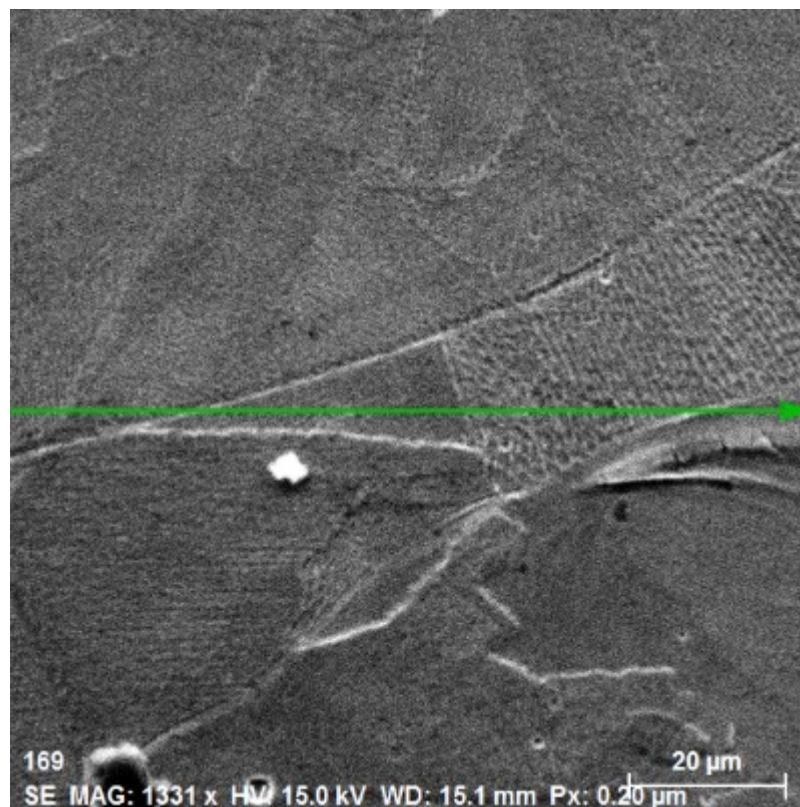
Obr. 56: SEM Příčný vzorek 21TZ, plocha podrobena prvkovému mappingu



Obr. 57: SEM Příčný vzorek 21TZ, snímky pořízených prvkových map

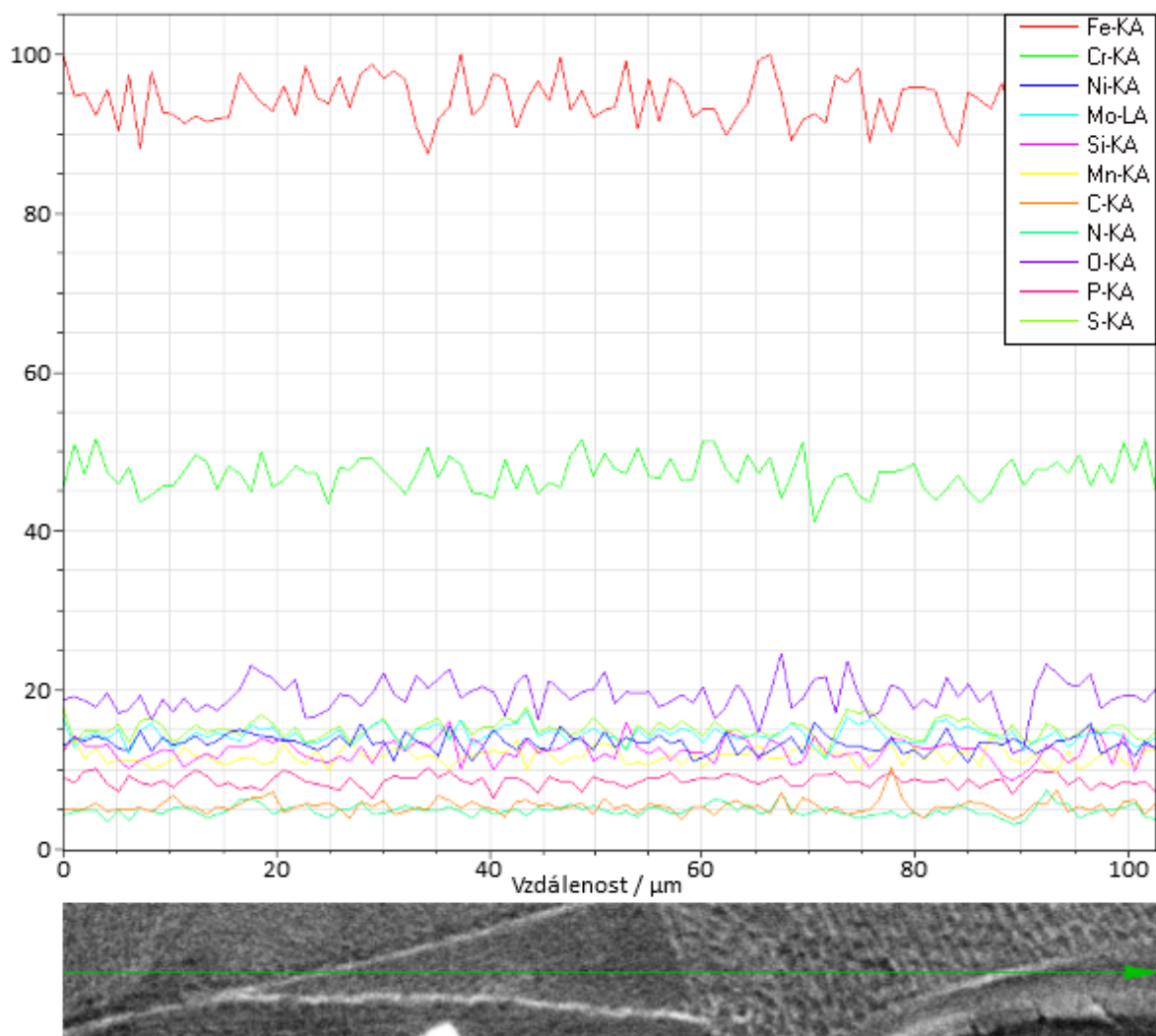
Liniová analýza taktéž ukázala relativně rovnoměrné rozložení prvků, bez žádných rozdílů v koncentracích mezi vnitřkem a hranicemi jednotlivých zrn. Na obrázku 58 a 59 jsou uvedeny snímky z liniové analýzy vzorku 42TZ. Na obrázku 58 je vyobrazeno

umístění měřené úsečky (linie) a na obrázku 59 jsou pak uvedeny výsledné průběhy koncentrací sledovaných prvků.



Obr. 58: SEM příčný vzorek 42TZ, umístění měřené úsečky





Obr. 59: SEM příčný vzorek 42TZ, průběh koncentrací prvků po úsečce

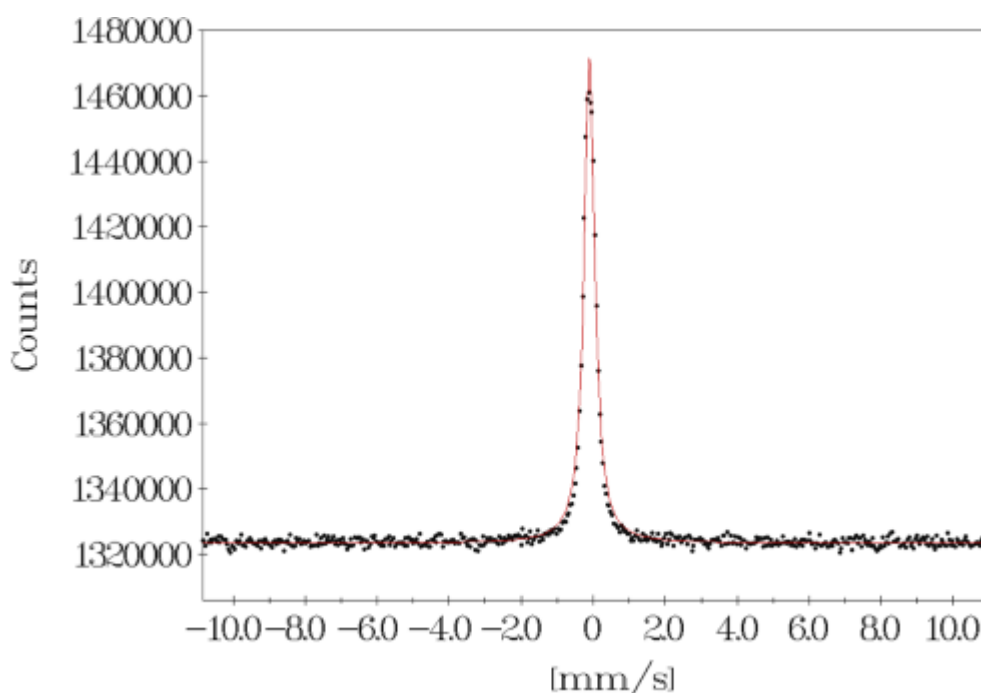
#### 5.2.4 Mikrostrukturní hodnocení pomocí Mössbauerovy spektroskopie

Mössbauerova spektroskopie byla provedena na celkem čtyřech trojicích vzorků, přičemž každá z trojic vzorků pocházela z jednoho ze vzorkových válců určených pro odběr vzorků (viz podkapitola 5.1). Jmenovitě se jednalo se o následující vzorky:

- 44NA, 44NB a 45N odebrané ze vzorkového tělesa ze sady 400-N
- 44TZA, 44TZB a 45TZ odebrané ze vzorkového tělesa ze sady 400-TZ
- 24NA, 24NB a 25N odebrané ze vzorkového tělesa ze sady 200-N
- 24TZA, 24TZB a 25TZ odebrané ze vzorkového tělesa ze sady 200-TZ

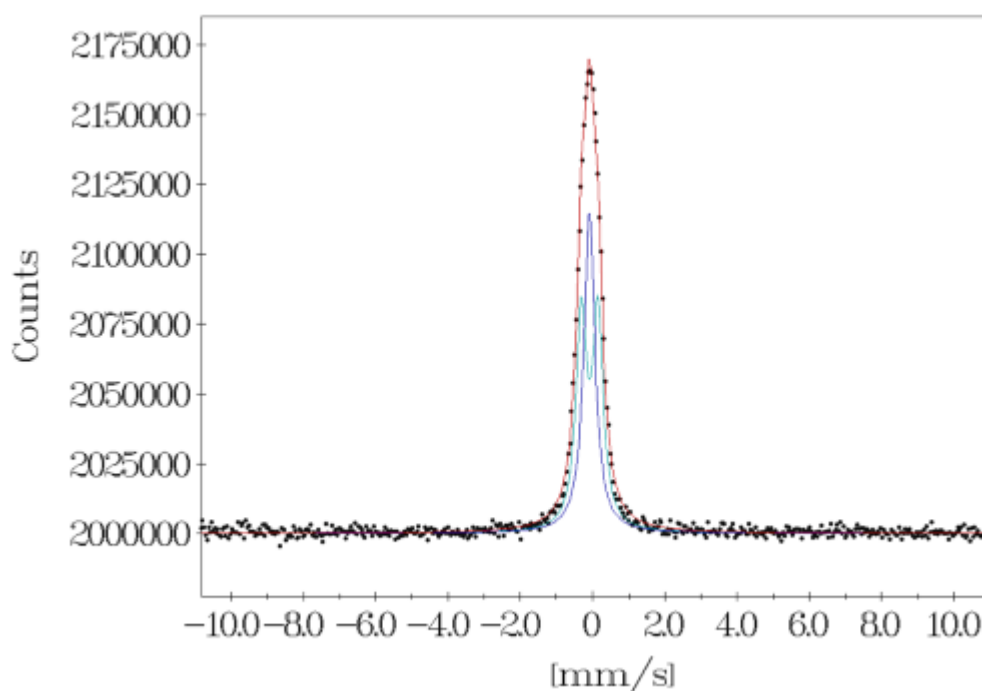
K hodnocení vzorků byla využita odrazová forma Mössbauerovy spektroskopie, hloubka měření činila cca 50  $\mu\text{m}$ . U každého ze vzorků byl hodnocen povrch (neřezová plocha – plocha představující část povrchu původního tělesa) a plocha či plochy řezu. Před samotným měřením bylo měřicí zařízení kalibrováno pomocí vzorku tvořeného čistým železem  $\alpha$ .

Při měření povrchů vzorků (neřezových ploch) byl u všech vzorků zaznamenán stejný výsledek ve formě jednoho singletu (peaku), který odpovídá austenitické struktuře bez výskytu žádné další strukturní či oxidické příměsi. Výsledné spektrum jednoho z měřených vzorků uvedeno na obrázku 60.



Obr. 60: Mössbauerovo spektrum neřezové plochy vzorku

Měření ploch řezů vzorků byl u všech vzorků zaznamenán stejný výsledek ve formě rozšířeného singletu (peaku). Tento výsledný singlet (peak) byl následně matematicky rozložen na dvě komponenty. První z komponent odpovídá singletu austenitické struktury a jedná se o stejný singlet, jaký byl pozorován při měření povrchu. Původ druhé komponenty není jasný, ale je možné, že se jedná o následek plastické deformace a/nebo kontaminace plochy řezu vzniklé při odběru vzorků. Spektrum plochy řezu jednoho z těles je uvedeno na obrázku 61.



Obr. 61: Mössbauerovo spektrum plochy řezu vzorku.

### 5.2.5 Shrnutí výsledků metalografického hodnocení

Metalografickým hodnocením byla u všech vzorků odhalena austenitická lící struktura, která byla dále potvrzena Mössbauerovou spektroskopií. U všech vzorků ze všech hodnocených těles byly dále pozorovány stejné texturní a strukturní prvky. Rozdíl mezi 400W a 200W vzorky spočíval v několikanásobně vyšším výskytu pórů u 200W vzorků a na druhou stranu ve vyšším výskytu převážně interkrystalických mikrotrhlin u všech 400W vzorků. Mezi tepelně zpracovanými a tepelně nezpracovanými tělesy nebyl dle očekávání pozorován žádný rozdíl.

Makroskopickým hodnocením vzorků odebraných z horní zbarvené a dolní základní části vybraných vzorkových těles byl zjištěn rozdíl v pórovitosti, který byl pravděpodobně způsoben změnou ve střední teplotě těles způsobenou zkrácením cyklů tisku, po dokončení výroby zkušebních hranolů. Tato pozorovaná změna naznačuje, že výrobky vyráběné při proměnlivé délce výrobních cyklů mohou vykazovat nehomogenní rozložení některých strukturních prvků, přinejmenším pórů.

Metalografickým hodnocením byly zjištěny závažné strukturní nedostatky především ve formě vysokého výskytu pórů, přítomnosti interkrystalických mikrotrhlin a možné přítomnosti neidentifikovaných mikročástic na hranicích austenitických zrn. Na základě



výsledků metalografického hodnocení lze usoudit, že vyrobená vzorková tělesa budou mít zhoršené mechanické vlastnosti.

Při SEM elektronové mikroskopii metalografických vzorků 42TZ a 21TZ bylo prvkovým mappingem a liniovou analýzou u obou vzorků zjištěno homogenní chemické složení, a to jak uvnitř zrn, tak mezi zrny. Žádné rozdíly v koncentracích prvků nebyly pozorovány ani na rozhraní zrn. Z těchto výsledků lze usoudit, že základní austenitická mikrostruktura je u všech vyrobených těles chemicky homogenní.

### **5.3 Analýza chemického složení metodou GD-OES**

Analýza chemického složení byla provedena na příčných vzorcích 43N, 43TZ, 23N, 23TZ a na náhradním 22N. Před provedením měření bylo GDOES zařízení kalibrováno pomocí tělesa o známém chemickém složení. Při provádění analýzy se vyskytnul problém při měření vzorku 23N, kdy se nedařilo odčerpávání vzduchu z pracovního prostoru a vzorek tak nemohl být analyzován. Tento problém byl pravděpodobně způsoben netěsností způsobenou vysokou pórovitostí měřeného vzorku 23N. Z důvodu selhání měření vzorku 23N bylo později provedeno měření na náhradním vzorku 22N. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Tabulka č. 8: Výsledky GD-OES spektrální analýzy chemického složení

		Naměřené hodnoty					Chem. Složení dle výrobce	$\Delta$
		400N	400TZ	200N	200TZ	průměr		
Cr	[%]	17.6	18.1	18.2	18.0	18.0	16.5 - 18.5	0
Ni	[%]	12.8	<b>13.2</b>	<b>13.1</b>	<b>13.9</b>	13.3	10.0 - 13.0	+0.3
Mo	[%]	2.46	<b>2.52</b>	2.45	<b>2.61</b>	2.51	2.0 - 2.5	+0.01
Mn	[%]	1.38	1.39	1.44	1.30	1.38	0 - 2.0	0
Si	[%]	0.69	0.70	0.73	0.62	0.69	0 - 1.0	0
P	[%]	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	$\leq 0.045$	0
C	[%]	-	-	-	-	-	$\leq 0.030$	-
S	[%]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	$\leq 0.030$	0
Al	[%]	0.16	0.18	0.16	0.19	0.17	-	-
Cu	[%]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	-	-
Ti	[%]	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	-	-
Co	[%]	0.09	0.10	0.09	0.11	0.10	-	-
B	[%]	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003	-	-
Pb	[%]	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	-	-
V	[%]	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	-	-
W	[%]	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	-	-
Zr	[%]	0.04	0.04	-	0.04	0.04	-	-

Naměřené hodnoty obsahu prvků u všech vzorků odpovídají chemickému složení výchozího materiálu AISI 316L. Naměřené obsahy dominantních legujících prvků (Cr, Ni, Mo) se obecně drží poblíž, a v některých případech i lehce nad horní hranici rozsahu pro daný materiál. U vzorků 43TZ, 23TZ a 22N jsou lehce překročeny maximální obsahy niklu a/nebo molybdenu, což by ale nemělo mít nijak důležitý vliv na strukturu a mechanické vlastnosti výrobků.

Naměřené chemické složení je u všech měřených vzorků podobné. Žádné prokazatelné rozdíly ve složení se nevyskytují ani mezi vzorky pocházejícími z těles vyrobených odlišnými výkonovými režimy. Tyto výsledky naznačují, že výrobním procesem nedošlo k pozorovatelnému poklesu (propalu) legujících prvků.

## 5.4 Mechanické zkoušky

### 5.4.1 Zkouška tahem

Ze vzorkových válců určených pro zkoušku tahem byla vyrobena zkušební tělesa kruhového průřezu. Výroba zkušebních těles byla provedena dle doporučení normy ČSN EN ISO 6892-1, rozměry zkušebních těles byly zvoleny dle doporučení přílohy D téže normy.

Zkoušky tahem byly provedeny na VŠB-TUO a v akreditované zkušební laboratoři VÍTKOVICE TESTING CENTER. Provádění a vyhodnocení zkoušky bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška probíhala při teplotě 20°C. Výsledky zkoušky tahem jsou uvedeny v tabulkách č. 9, 10 a 11, a v grafech č. 2 a 3.

Tabulka č. 9: Výsledky zkoušky tahem provedené v laboratoři VÍTKOVICE TESTING CENTER

Sada	Zkušební těleso	Rp0.2	Rm	A5	Z
		[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
400-N	T1	489	581	21.2	29.4
	T2	489	581	24.4	29.4
400-TZ	T1	498	601	<b>11.2</b>	19.0
	T2	497	621	20.0	29.4
200-N	T1	427	504	8.0	11.6
	T2	442	519	9.2	11.6
200-TZ	T1	405	472	<b>4.4</b>	7.8
	T2	440	514	8.0	7.8

Tabulka č. 10: Výsledky zkoušky tahem provedené na VŠB-TUO

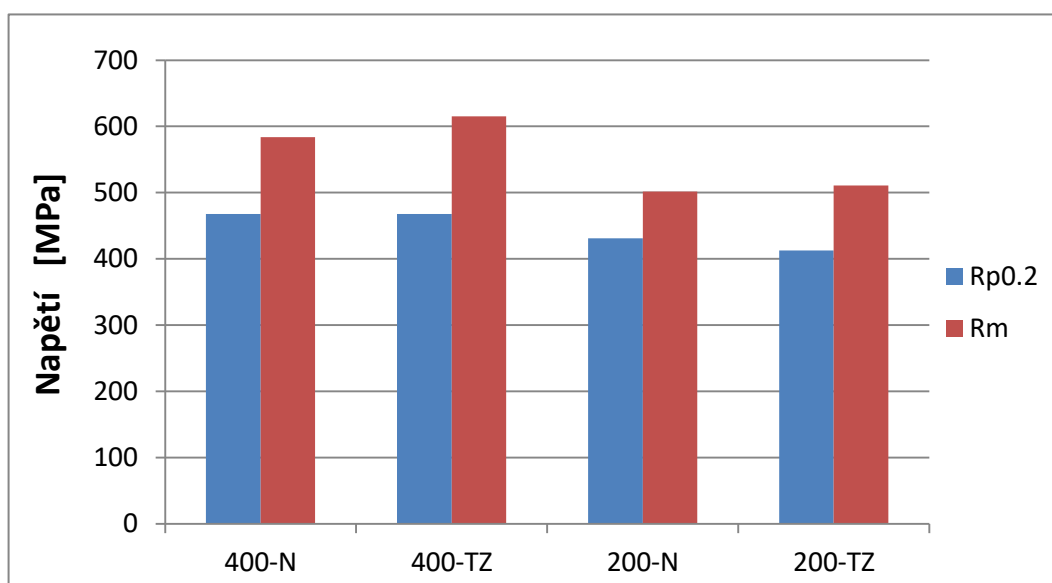
Sada	Zkušební těleso	Rp0.2	Rm	A5
		[MPa]	[MPa]	[%]
400-N	T3	425.7	589.3	25.7
400-TZ	T3	408.9	624.2	19.9
200-N	T3	423.7	482.5	<b>5.5</b>
200-TZ	T3	393.7	546.0	8.8

Ve výsledcích je možné vidět, že v případě sad 400-TZ, 200-N a 200-TZ se vždy u jednoho ze zkoušených těles vyskytuje značně nižší hodnota tažnosti (téměř poloviční oproti ostatním tělesům v sadě). Příčina těchto nízkých hodnot tažnosti není známa, ale je možné že se jedná o výsledek přítomnosti závažnější vnitřní vady či vad.

Tabulka č. 11: Průměrné hodnoty u jednotlivých sad

	Rp0.2	Rm	A5
	[MPa]	[MPa]	[%]
400-N	467.9	583.8	23.8
400-TZ	468.0	615.4	17.0
200-N	430.9	501.8	7.6
200-TZ	412.9	510.7	7.1
316L	> 190	520 - 670	35

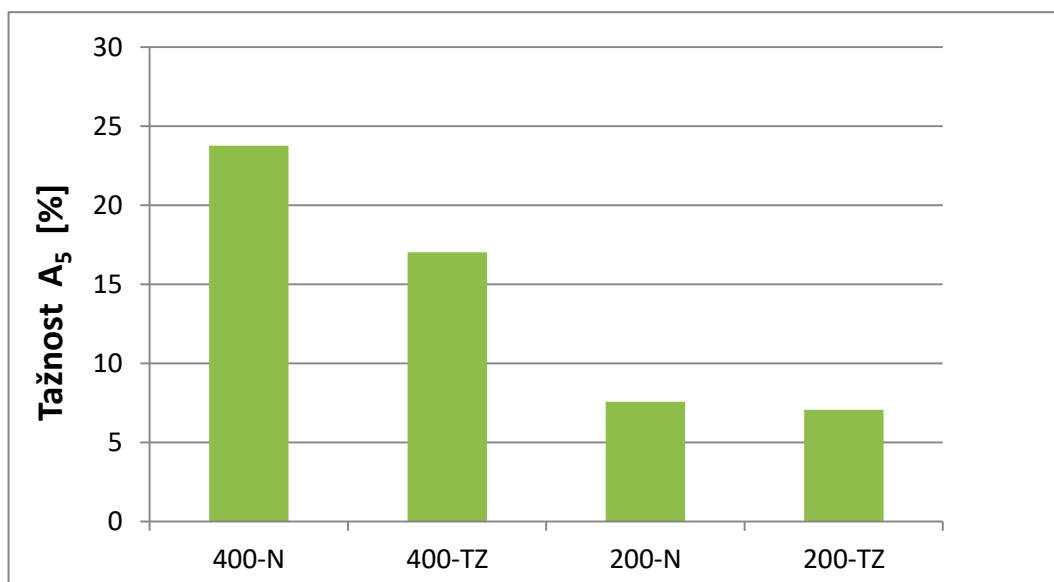
Graf č. 2: Srovnání průměrných hodnot smluvní meze kluzu  $R_{p0.2}$  a meze pevnosti  $R_m$



Naměřené hodnoty smluvní meze kluzu se u všech vzorků pohybují vysoko nad minimální hodnotou daného typu oceli. Mez pevnosti 400W vzorků odpovídá úrovni pevnosti dané oceli, zatímco mez pevnosti 200W vzorků se nachází mírně pod minimální hodnotou.

400W vzorky v porovnání s 200W vzorky vykazují v průměru o cca 18% vyšší hodnoty meze pevnosti a o cca 10% vyšší hodnoty smluvní meze kluzu. Rozdíly v pevnosti mezi tepelně zpracovanými a nezpracovanými vzorky jsou minimální. Tepelně zpracované vzorky vykazují pouze mírný nárůst hodnoty meze pevnosti.

Graf č. 3: Srovnání průměrných hodnot tažnosti  $A_5$



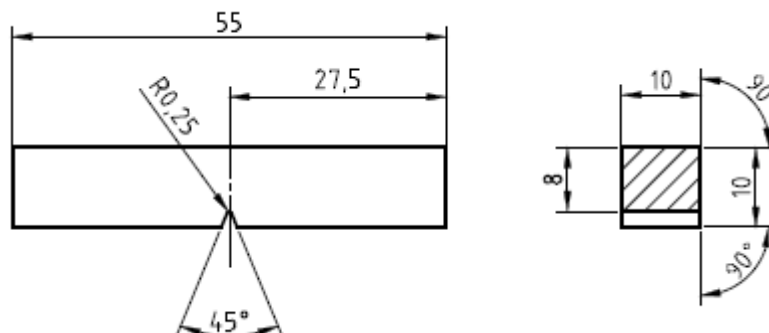
Naměřené hodnoty tažnosti jsou u všech vzorků velice nízké a zdaleka nedosahují hodnot výchozího materiálu ( $A_{5min}$  35%). Z výsledků je zřejmé, že hodnoty tažnosti 200W vzorků jsou oproti 400W vzorkům značně nižší.

Průměrné hodnoty tažnosti těles ze sad 400-TZ, 200-N a 200-TZ jsou ovlivněny dříve zmíněnými abnormálně nízkými hodnotami tažnosti vždy jednoho z těles v sadě.

Rozdíl v tažnosti mezi tepelně zpracovanými a nezpracovanými 200W vzorky je zanedbatelně malý. Rozdíl mezi zpracovanými a nezpracovanými 400W vzorky je výrazný, ale vzhledem k dříve zmíněným anomálním výsledkům neprůkazný.

### 5.4.2 Zkouška rázem v ohybu a hodnocení lomových ploch

Ze všech vzorkových hranolů byla vyrobena standardizovaná zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy. Geometrie zkušebních těles vycházela z doporučení normy ČSN EN ISO 148-1. Na obrázku 62 je uvedeno schéma vyráběných zkušebních těles, pro zkoušku byla zvolena varianta standardního tělesa s V vrubem.



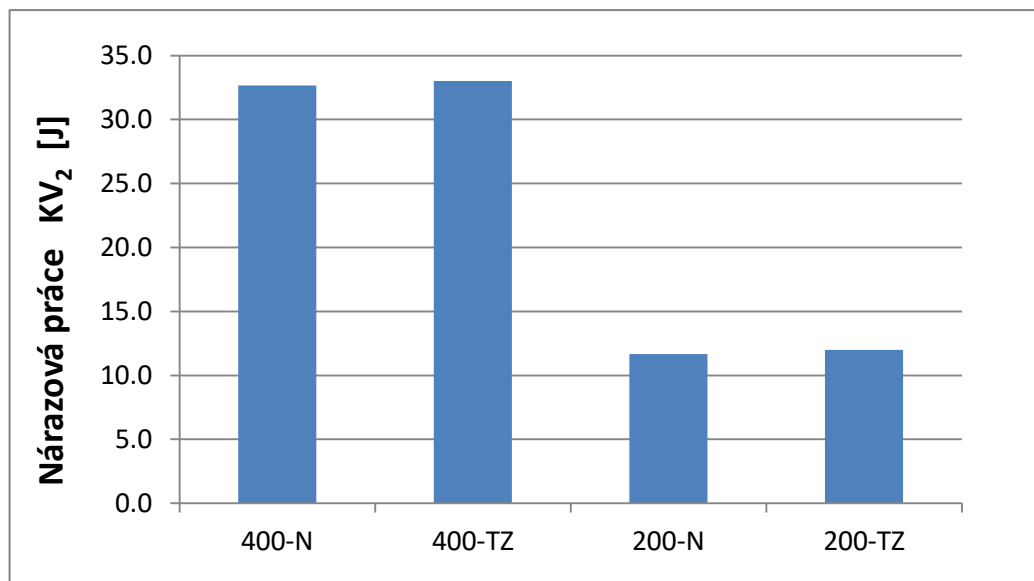
Obr. 62: Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy

Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy byla provedena akreditovanou zkušební laboratoří VÍTKOVICE TESTING CENTER. Zkouška byla provedena a vyhodnocena dle normy ČSN EN ISO 148-1. Pro zkoušku byl použit břit o poloměru 2 mm, zkušební teplota činila 20°C. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce č. 12 a grafu č. 4.

Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty nárazové práce  $KV_2$

Zkušební těleso	400-N	400-TZ	200-N	200-TZ
	Nárazová práce ( $KV_2$ )			
	[J]			
V1	35	32	12	13
V2	31	37	11	12
V3	32	30	12	11
průměr	32.7	33.0	11.7	12.0

Graf č. 4: Srovnání průměrných hodnoty nárazové práce  $KV_2$



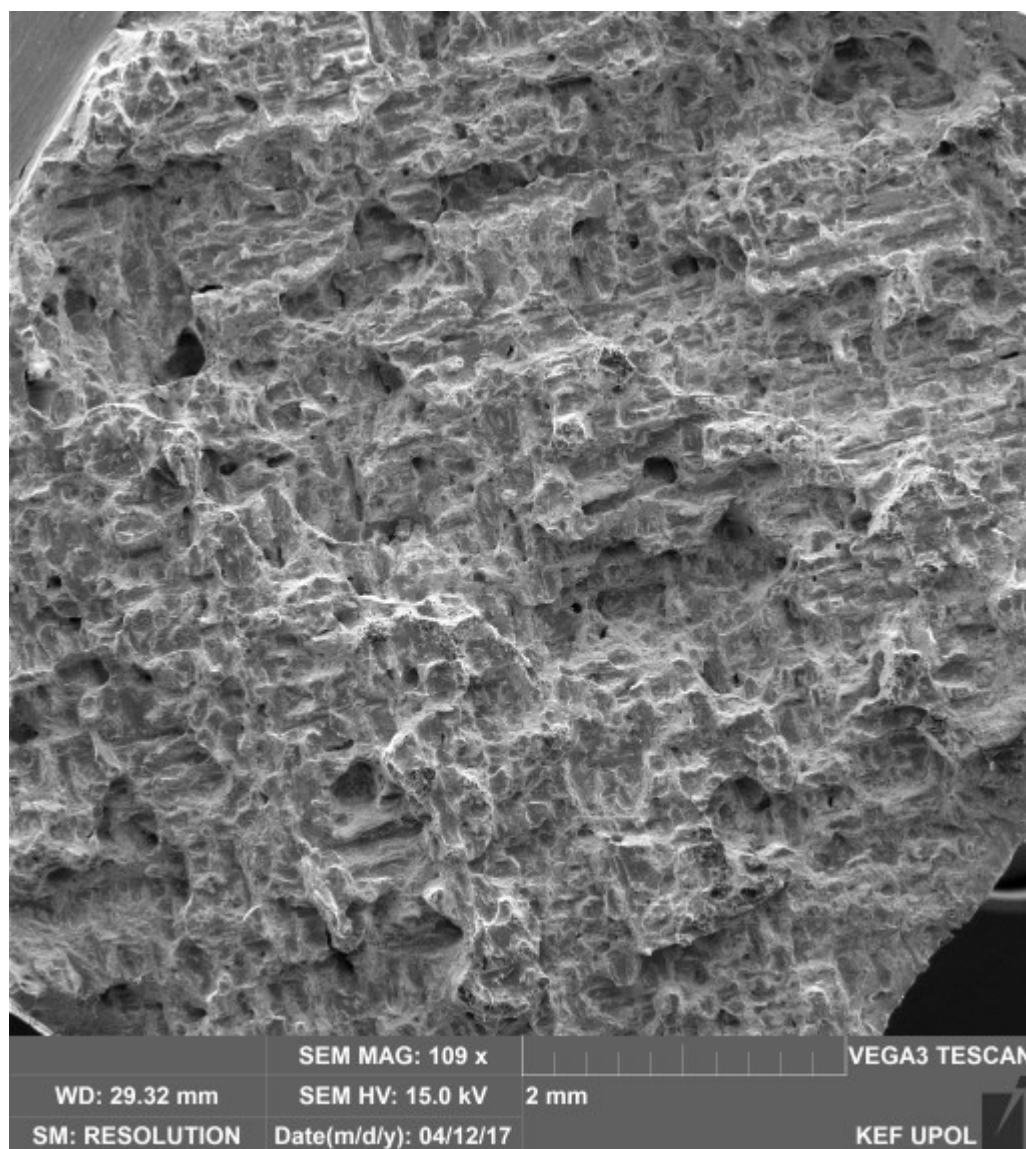
Naměřené hodnoty nárazové práce jsou velice nízké a v žádném případě neodpovídají hodnotě výchozího materiálu, která činí 60 J při 20°C.

Z výsledků je zřejmý značný rozdíl v nárazové práci mezi 400W a 200W vzorky. 400W vzorky vykazují v průměru cca trojnásobně vyšší hodnoty nárazové práce než vzorky 200W. Rozdíl mezi tepelně zpracovanými a nezpracovanými vzorky je zanedbatelně malý (v průměru pouze desetiny joulu).

## SEM elektronová mikroskopie lomových ploch

Předmětem hodnocení byly lomové plochy zkušebních těles ze sad 400TZ a 200TZ po zkoušce rázem v ohybu. Hodnocena byla lomová plocha vždy jednoho tělesa ze sady.

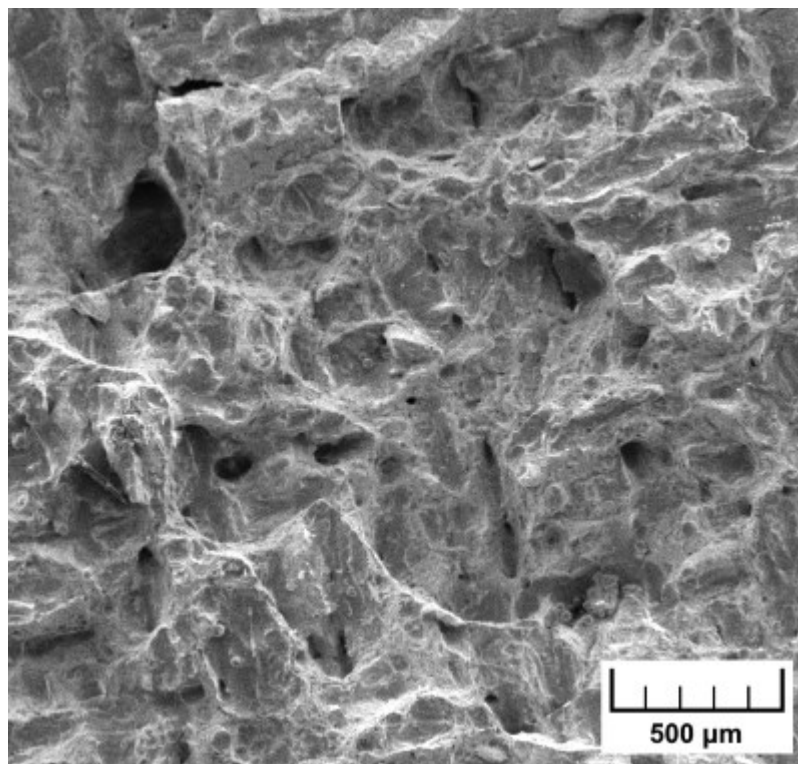
### Lomová plocha vzorku 400TZ



Obr. 63: Lomová plocha vzorku 400TZ

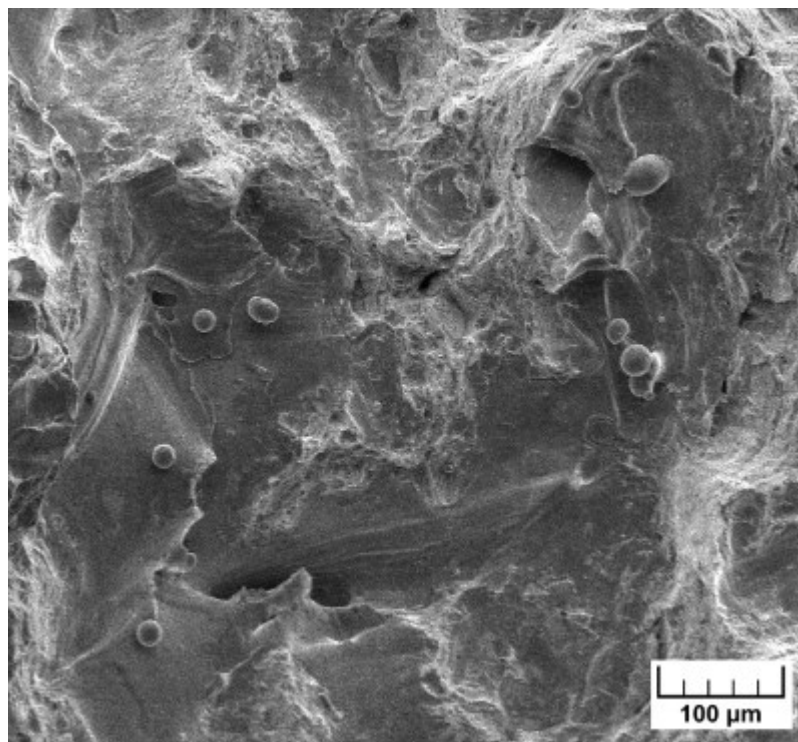
Lomová plocha vzorku (obr. 63) vykazuje značnou členitost. V makroměřítku lze na ploše pozorovat náznaky křížování svarových vrstev. Na lomové ploše je dále možné sledovat výskyt pórů a to především na rozhraní sousedících svarových vrstev. Příklad tohoto rozložení pórů je možné vidět na obrázku 64.





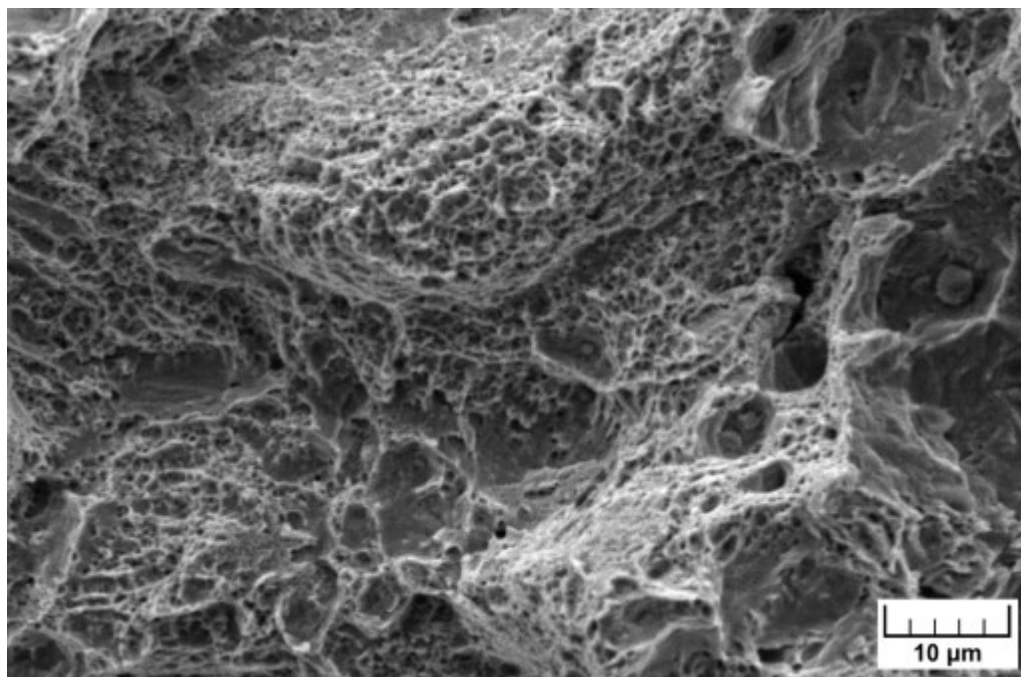
Obr. 64: Lomová plocha vzorku 400TZ, detail pórovitosti

Při větším zvětšení je na povrchu lomu dále možné pozorovat výskyt relativně sférických částic o průměrné velikosti cca 25 μm. Tyto částice jsou v některých případech viditelně částečně nataveny a spojeny se základním materiálem. Tyto částice jsou s největší pravděpodobností pozůstatky nepřetaveného práškového kovu. Příklad pozorovaných částic je uveden na obrázku 65.



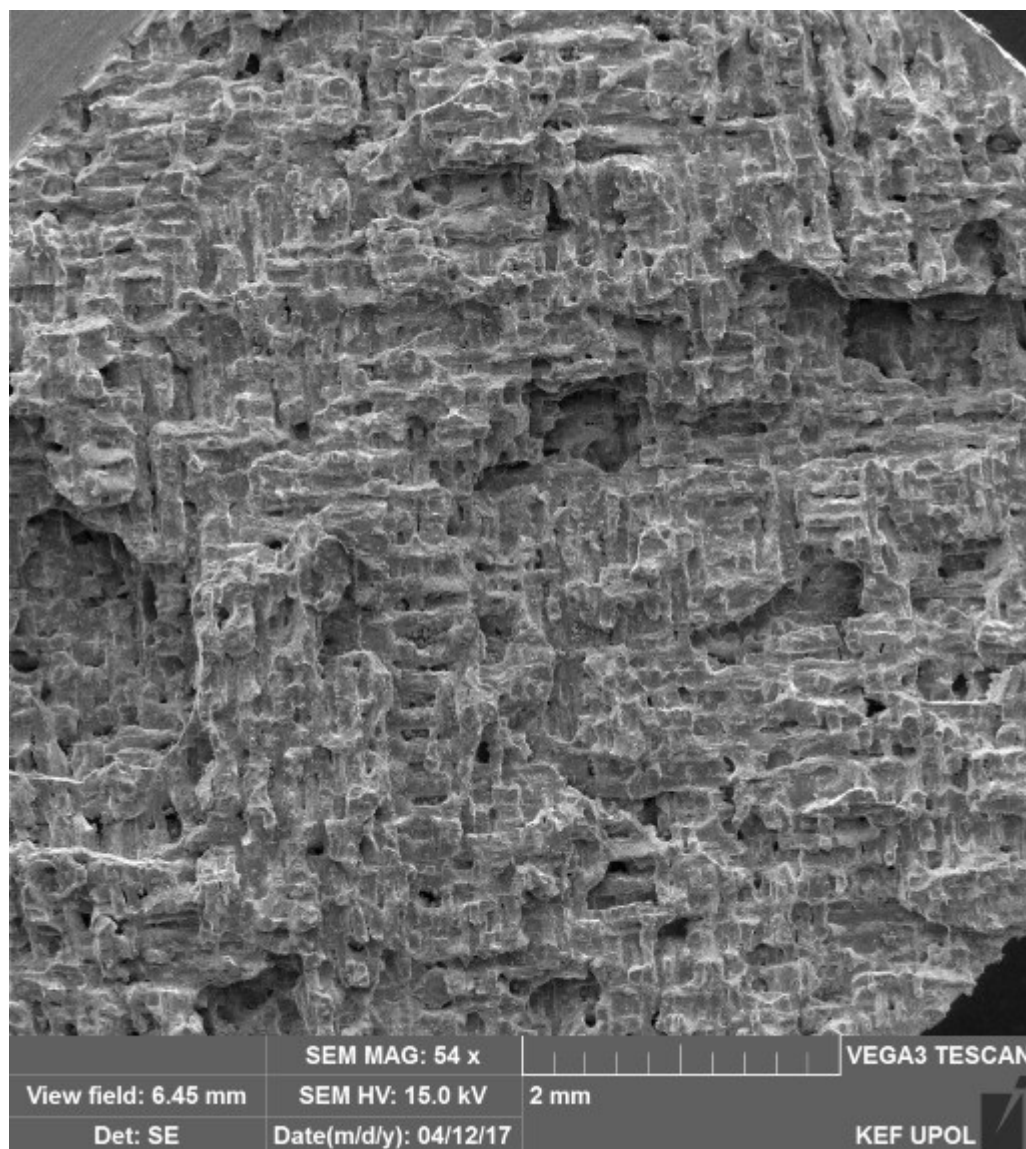
Obr. 65: Lomová plocha vzorku 400TZ, detail sférických částic

Lomová plocha vykazuje především charakter tvárného transkrystalického lomu, na obrázku 66 je uveden detail pozorovaného porušení, obsahujícího pro tvárný lom typickou jamkovou texturu.



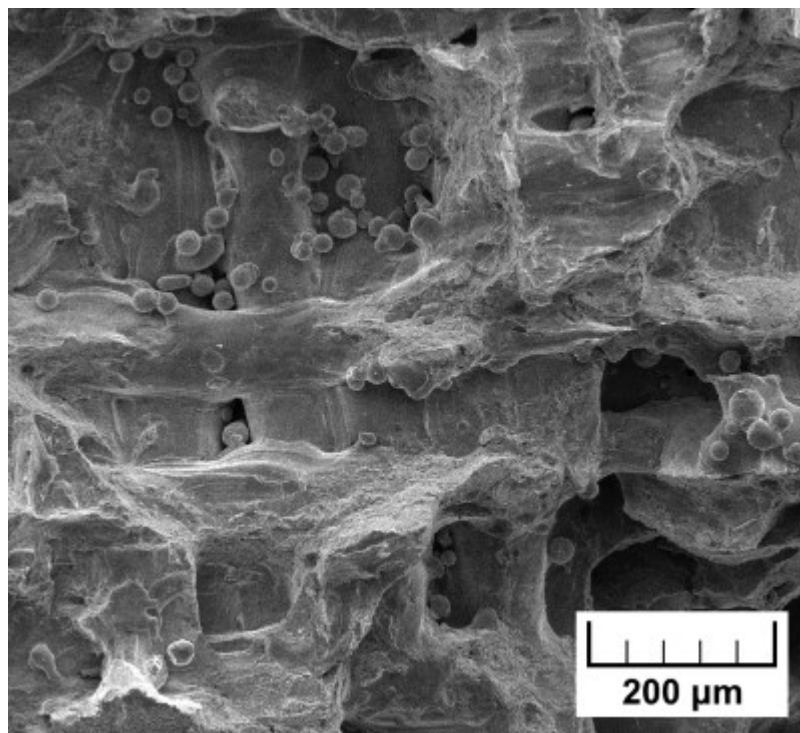
Obr. 66: SEM Lomová plocha vzorku 400TZ, detail tvárného lomu

### Lomová plocha vzorku 200TZ

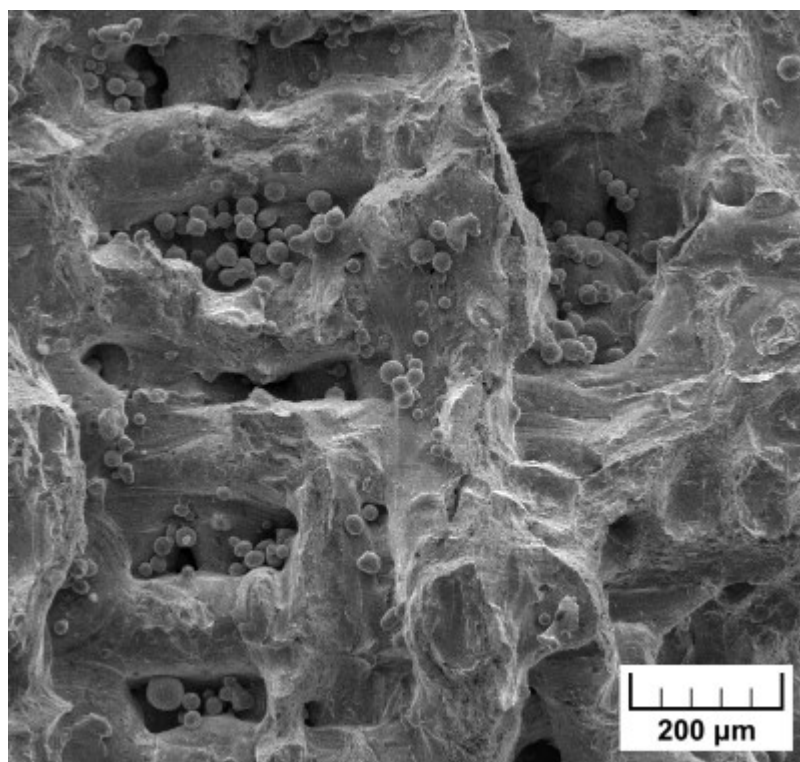


Obr. 67: SEM lomová plocha vzorku 200TZ

Podobně jako u lomové plochy vzorku 400TZ i lomová plocha vzorku 200TZ (obr. 67) je značně členitá. V makroměřítku lze na ploše pozorovat velmi výrazné křížování svarových vrstev, detail tohoto křížení vrstev je možné vidět na obrázku 68. Mnohé z těchto svarových vrstev jsou od sebe viditelně odděleny četnými protáhlými póry, ve kterých je při větším zvětšení možné pozorovat vysoký výskyt mikroskopických sférických částic (viz obr. 69). Přítomnost částic v pórech naznačuje, že se jedná o kapsy nepřetaveného prášku. Celkové množství pozorovaných sférických částic je u tohoto vzorku značně vyšší, než u vzorku 400TZ, toto vyšší množství částic souvisí s metalograficky zjištěnou vyšší mírou pórovitosti u všech 200W těles.

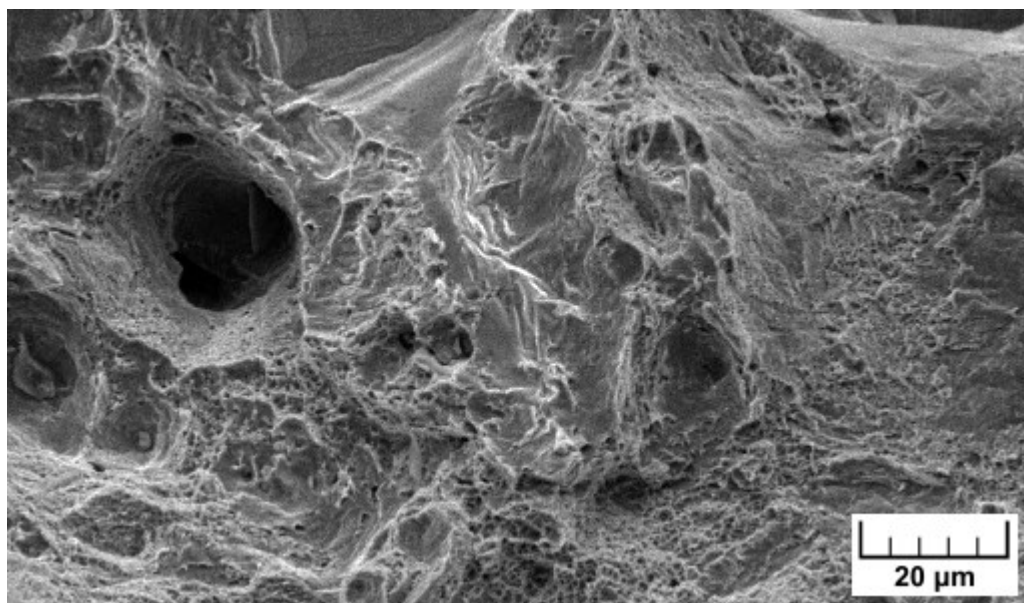


Obr. 68: SEM lomová plocha vzorku 200TZ, detail křížení svarových vrstev



Obr. 69: SEM lomová plocha vzorku 200TZ, detail svarových stop oddělených póry

Lomová plocha vzorku 200TZ vykazuje především charakter kvazištěpného transkrystalického lomu, detail pozorovaného lomu je uveden na obrázku 70.



Obr. 70: SEM lomová plocha vzorku 200TZ, detail pozorovaného kvazištěpného lomu

Výsledky hodnocení lomových ploch odpovídají výsledkům zkoušky rázem v ohybu. Výrazná přítomnost především mezi-svarové pórovitosti na lomových plochách obou vzorků vysvětluje obecně nízké hodnoty nárazové práce. Značný rozdíl v nárazové práci mezi vzorky 400TZ a 200TZ vysvětlují, kromě rozdílů v pórovitosti, také pozorované typy lomu, kdy vzorek 200TZ vykazuje dominantní výskyt kvazištěpného transkrystalického lomu, zatímco vzorek 400TZ vykazuje dominantní přítomnost tvárného transkrystalického lomu.

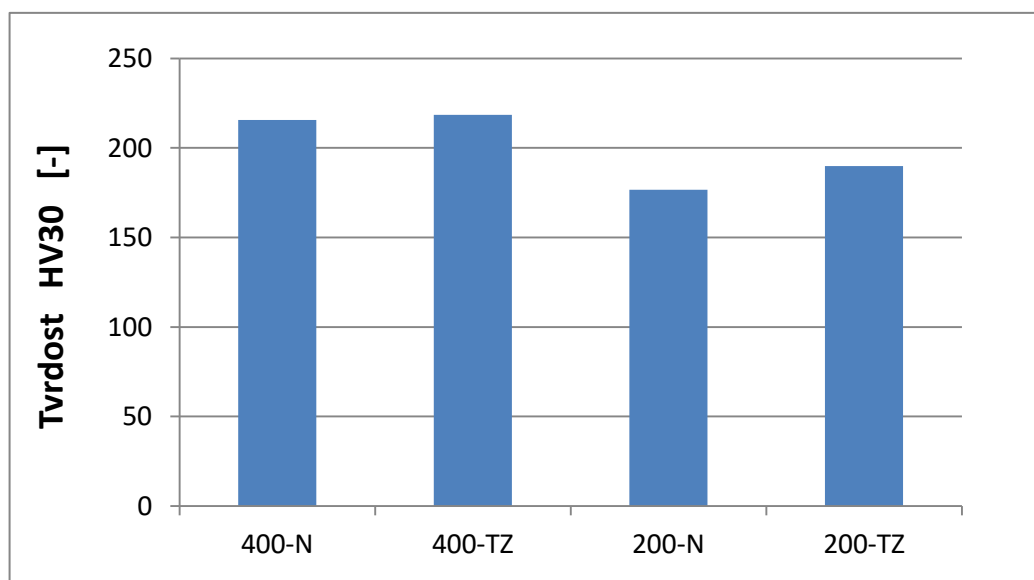
#### 5.4.3 Měření tvrdosti podle Vickerse

Měření tvrdosti bylo provedeno pomocí tvrdoměru LECO 700LV. Měření bylo provedeno na vzorcích 43N, 43TZ, 23N, 23TZ a měřena byla tvrdost HV30 (zatížení 294,2 N). Měření bylo provedeno a vyhodnoceno dle doporučení normy ČSN EN ISO 6507. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č. 13 a grafu č. 5 níže.

Tabulka č. 13: Naměřené hodnoty tvrdosti HV30

Vpich	400-N	400-TZ	200-N	200-TZ
	Tvrdost HV30			
	[-]			
1	213.7	226.6	177.9	180.3
2	220.7	217.9	172.1	181.4
3	214.6	222.5	183.8	204.5
4	215.7	202.8	184.6	185.4
5	213.3	222.2	165.0	198.0
průměr	215.6	218.4	176.68	189.92

Graf č. 5: Srovnání průměrných hodnot tvrdosti HV30



Oproti tvrdosti výchozího materiálu (226HV) jsou hodnoty tvrdosti u všech vzorků nižší, a to u 400W vzorků mírně a u 200W výrazněji. Hodnoty tvrdosti 400W vzorků jsou v průměru o cca 18% vyšší než u vzorků 200W. Tepelně zpracované vzorky vykazují mírně zvýšené hodnoty tvrdosti.

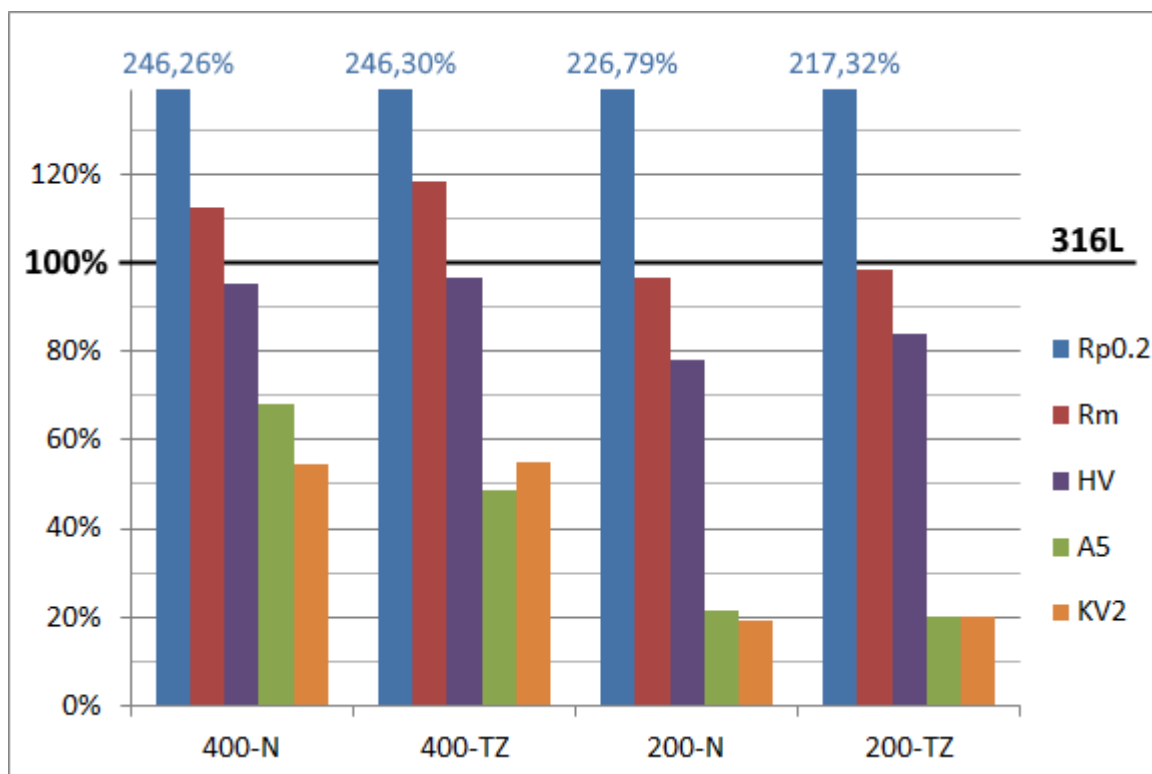
#### 5.4.4 Vyhodnocení mechanických zkoušek

Z výsledků mechanických zkoušek je zřejmé, že mechanické vlastnosti žádných z testovaných sad těles neodpovídají vlastnostem charakteristickým pro danou ocel 316L.

Problémem jsou především plastické vlastnosti, kdy se naměřené hodnoty tažnosti a nárazové práce u všech těles nachází hluboko pod minimální úrovní dané oceli (316L -  $A_5 = 35\%$ ,  $KV = 60$  J). Pevnostní vlastnosti těles jsou o poznání lepší, smluvní mez kluzu se u všech těles nachází vysoko nad minimální úrovní (316L -  $R_{p0,2} = 190$  MPa). Mez pevnosti se u 400W těles nachází v rozsahu dané oceli (316L -  $R_m = 520-670$  MPa), zatímco mez pevnosti 200W vzorků se nachází mírně pod minimální hodnotnou. Naměřené hodnoty tvrdosti všech těles jsou mírně nižší, než je typické pro danou ocel (316L - 226HV).

V grafu č. 6 jsou uvedeny souhrnné výsledky měření mechanických vlastností. Hodnoty v grafu jsou uvedeny v procentech relativně vůči orientačním minimálním hodnotám výchozího materiálu austenitické oceli 316L.

Graf č. 6: Souhrnné výsledky mechanických zkoušek



Celkově nejlepších výsledků pevnostních i plastických vlastností dosahují všechna tělesa vyrobená výkonem 400W. Průměrné hodnoty meze pevnosti 400W těles jsou o 18,43% vyšší než průměrné hodnoty pevnosti 200W těles. Tomuto rozdílu v pevnosti odpovídají i naměřené hodnoty tvrdosti, kdy vzorky z 400W těles vykazují v průměru o 18,39% vyšší tvrdost, než vzorky z těles 200W. Plastické vlastnosti 400W těles jsou znatelně lepší než 200W těles, hodnoty tažnosti a nárazové práce jsou u 400W těles 2x až 3x vyšší než u těles 200W, stále jsou však znatelně pod minimálními hodnotami dané oceli.

Značně nižší hodnoty plastických vlastností u 200W těles jsou pravděpodobně výsledkem vysoké míry pórovitosti zjištěné při makrostrukturním hodnocení. Výrazně nižší hodnoty nárazové práce u těchto těles byly také výsledkem dominantního kvazištěpného charakteru transkrystalického lomu, který byl na lomové ploše pozorován při SEM elektronové mikroskopii.

Rozdíly v mechanických vlastnostech tepelně zpracovaných a tepelně nezpracovaných vzorků jsou s výjimkou tažnosti velice nízké. Větší rozdíly v hodnotách tažnosti nejsou z důvodu abnormálně nízkých hodnot u některých vzorkových těles průkazné.

Obecně velmi nízké a někdy různorodé rozdíly v mechanických vlastnostech mezi tepelně zpracovanými a nezpracovanými tělesy naznačují, že použité tepelné zpracování ve formě žíhání ke snížení vnitřních pnutí nemá prokazatelný dopad na výsledné mechanické vlastnosti vyrobených vzorkových těles.



## 6 Závěr

Diplomová práce se zabývala studiem strukturních, mechanických a chemických vlastností ocelových výrobků vyrobených technologií 3D tisku SLM a srovnáním vlastností, jakých dosahují výrobky vyrobené různou kombinací výkonových režimů a stupňů dokončení. V první, teoretické části práce byly uvedeny a stručně popsány základní technologie 3D tisku umožňující výrobu z kovů, následně byla popsána problematika výroby kovových výrobků technologií SLM a dále byly stručně popsány zkušební a měřicí metody, kterých bylo při studiu využito. V úvodu druhé, experimentální části práce byl nejprve popsán vstupní materiál, kterým byla austenitická korozivzdorná ocel AISI 316L ve formě prášku, dále byl dle doporučení norem, a dle požadavků a možností zkušebních, měřicích a výrobních zařízení proveden návrh vhodných vzorkových těles, a následně byl popsán průběh výroby těchto těles. V hlavním oddílu experimentální části práce byly potupně popsány a vyhodnoceny prováděné zkoušky a měření, kterými bylo: Metalografické hodnocení makro a mikrostruktury pomocí optické a SEM elektronové mikroskopie a pomocí Mössbauerovy spektroskopie, analýza chemického složení metodou GD-OES, zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu metodou Charpy doplněná SEM elektronovou mikroskopií lomových ploch a měření tvrdosti.

Provedeným makro a mikrostrukturním hodnocením byly u všech zkoušených těles odhaleny závažné strukturní nedostatky, které se při mechanickém zkoušení projevíly především zhoršenými plastickými vlastnostmi. Strukturním hodnocením bylo navíc odhaleno heterogenní rozložení pórovitosti, které bylo pravděpodobně způsobeno dynamičností výrobního procesu. Chemickou analýzou vzorků bylo odhaleno chemické složení odpovídající vstupnímu materiálu, bez pozorovaného poklesu legujících prvků propalem.

Srovnáním výrobků vzniklých při různých výrobních režimech bylo zjištěno, že všechny výrobky vyrobené výkonovým režimem 400W dosahují celkově lepších mechanických i strukturních vlastností. Srovnáním bylo dále zjištěno, že použité tepelné zpracování nemá prokazatelný vliv na strukturní ani mechanické vlastnosti zkoušených výrobků.

V práci byl proveden poměrně široký náhled do strukturních, mechanických a chemických vlastností výrobků vyrobených z oceli 316L technologií SLM. Díky studiu a srovnání strukturních a mechanických vlastností výrobků bylo zjištěno, jakých vlastností tyto výrobky dosahují a jaký dopad na tyto vlastnosti mají rozdílné výkonové režimy a použité tepelné zpracování. Další výzkum by mohl být zaměřen na identifikaci pozorovaných fází a interkrystalicky vyprecipitovaných mikročástic, které se nepodařilo v rámci této práce identifikovat. Předmětem dalšího bádání by také mohl být efekt orientace a proměnné geometrie výrobků na stabilitu teplotního příkonu při výrobě. Dynamičnost teplotního příkonu byla totiž pravděpodobným zdrojem rozdílné koncentrace pórovitosti v různých místech vyrobených vzorkových válců. Další výzkum by se obecně mohl týkat kteréhokoli aspektu 3D tisku, jde totiž o relativně mladou a neprobádanou oblast výrobních technologií se značným potenciálem.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Petru Mohylovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této práce. Rád bych také poděkoval panu prof. RNDr. Miroslavu Mašláňovi, CSc. za spolupráci a zajištění měření na půdě Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci a panu Ing. Zdeňku Štorkánovi za rady a připomínky týkající se metalografie a fraktografie.

Tato práce vznikla ve spolupráci s pracovištěm UPrint 3D, které je součástí Vědeckotechnického parku Univerzity Palackého v Olomouci.

## 7 Seznam použitých pramenů

- [1] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [2] The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry*. [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>
- [3] Laser Melting (LM). *Additively*. [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting>
- [4] Electron Beam Melting (EBM). *Additively*. [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting>
- [5] Binder Jetting (BJ). *Additively*. [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>
- [6] WILLIAMS, S. W., F. MARTINA, A. C. ADDISON, J. DING, G. PARDAL a P. COLEGROVE. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. [online]. 2015, 32(7), 641-647 [cit. 2017-04-14]. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- [7] 8 steps of 3D printing process. *3D Printing from scratch*. [online]. [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printing-process/>
- [8] Metal Powder for Additive Manufacturing. *Sandvik*. [online]. [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <http://smt.sandvik.com/en/products/metal-powder/additive-manufacturing/>
- [9] .materials. *ConceptLaser*. [online]. [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <http://www.conceptlaserinc.com/materials/>
- [10] SAMES, W. J., F. A. LIST, S. PANNALA, R. R. DEHOFF a S. S. BABU. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. [online]. 2016, 61(5), 315-360 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649. ISSN 0950-6608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2015.1116649>

- [11] Porosity in metal components made using Selective Laser Melting. *Inside Metal Additive Manufacturing*. [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/porosity-in-metal-components-made-using-selective-laser-melting>
- [12] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ziheng YI a Xubin SU. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [online]. 2013, 65(9-12), 1471-1484 [cit. 2017-03-31]. DOI: 10.1007/s00170-012-4271-4. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4271-4>
- [13] SILBERNAGEL, Arnošt. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Ostrava: Kovosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [14] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [15] ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [16] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [17] VODÁREK, Vlastimil. *Metody studia struktury: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2559-5.
- [18] Použití metody GD-OES. *Oddělení povrchového inženýrství Západočeské univerzity v Plzni*. [online]. [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/Pouziti\\_metody\\_GD-OES.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Pouziti_metody_GD-OES.pdf)
- [19] GÜTLICH, Philipp, Eckhard BILL a Alfred TRAUTWEIN. *Mössbauer spectroscopy and transition metal chemistry: fundamentals and application*. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN 978-3-540-88427-9.
- [20] <sup>57</sup>Fe. *Periodictable*. [online]. [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.periodictable.com/Isotopes/026.57/index.html>

- [21]  $^{57}\text{Co}$ . *Periodictable*. [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z:  
<http://www.periodictable.com/Isotopes/027.57/index.html>
- [22] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy mezinárodních svářečských inženýrů, technologů a pro výuku svařování na vysokých školách*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [23] CL 20ES Stainless steel. *ConceptLaser*. [online]. [cit. 2017-01-13]. Dostupné z:  
[http://www.conceptlaserinc.com/wp-content/uploads/2016/10/1016-CL-20ES\\_EN\\_Korr1\\_lowres-web.pdf](http://www.conceptlaserinc.com/wp-content/uploads/2016/10/1016-CL-20ES_EN_Korr1_lowres-web.pdf)
- [24] Převodní tabulka značení ocelí. *E-konstrukter*. [online]. [cit. 2017-01-13]. Dostupné z:  
<http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli>
- [25] Material No.: 1.4404. *Woite-edelstahl*. [online]. [cit. 2017-01-13]. Dostupné z:  
<http://www.woite-edelstahl.com/14404en.html>
- [26] X2CrNiMo17-12-2 (1.4404). *SteelNumber: European Steel and Alloy Grades*. [online]. [cit. 2017-01-13]. Dostupné z:  
[http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=104](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=104)
- [27] Can we “3D-Print” an Electric Motor?. *The University of Nottingham*. [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://blogs.nottingham.ac.uk/innovate/2015/08/10/can-we-3d-print-an-electric-motor/>
- [28] 3D Printing. *Custompart.net*. [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- [29] Building large metallic parts with wire arc additive manufacturing. *Inside Metal Additive Manufacturing*. [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z:  
<http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/building-large-metallic-parts-with-wire-arc-additive-manufacturing>



- [30] COURTOIS, Mickael, Muriel CARIN, Philippe Le MASSON, Sadok GAIED a Mikhaël BALABANE. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. [online]. 2013, 46(50), 505305- [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1088/0022-3727/46/50/505305. ISSN 0022-3727. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0022-3727/46/i=50/a=505305?key=crossref.cb1eaadf4d6b9f6e5fe57f49a825b655>
- [31] Strojírenská technologie – 1. Ročník Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. *Strojirenstvi*. [online]. [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: [http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)
- [32] Horiba GD-Profiler-2: Glow Discharge Optical Emission Spectrometer. *Molecular Engineering & Sciences Institute*. [online]. [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.moles.washington.edu/maf/research-tools/gdoes/>
- [33] Introduction to Mossbauer Spectroscopy. *OpenStax*. [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://cnx.org/contents/D-IR7ucO@7/Introduction-to-Mossbauer-Spec>
- [34] M2 Cusing Metal 3D Printer. *Bolee Machine Tool Ltd.*. [online]. [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: <http://www.bolee.com.hk/m2-cusing-metal-3d-printer/>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma SLM zařízení.....	12
Obr. 2: Schéma EBM zařízení .....	13
Obr. 3: Schéma BJ zařízení.....	14
Obr. 4: Schéma principu technologie BD .....	15
Obr. 5: Schéma funkce LOM zařízení .....	16
Obr. 6: Příklad výrobku vyrobeného technologií WAAN.....	17
Obr. 7: Typy pórovitosti .....	22
Obr. 8: Princip zachycení plynu při uzavření tzv. klíčové dírky .....	22
Obr. 9: Makrotrhlíny a delaminace vzniklé při výrobě technologií SLM .....	23
Obr. 10: Kovové kuličky vzniklé při výrobě technologií EBM .....	24
Obr. 11: Princip vzniku makroskopických deformací .....	25
Obr. 12: Normalizované zkušební těleso kruhového průřezu.....	27
Obr. 13: Schéma Charpyho kladiva.....	28
Obr. 14: Schéma zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu.....	29
Obr. 15: Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse.....	30
Obr. 16: Základní principy zviditelnění leptáním, vlevo: přednostní leptání hranic zrn, vpravo: plošné leptání .....	32
Obr. 17: schéma SEM mikroskopu.....	33
Obr. 18: Schéma funkce GD-OES spektrometru.....	34
Obr. 19: Schéma Mössbauerových spektrometrů. A: transmisní, B: odrazový.....	35
Obr. 20: Schéma vzorkových těles a jejich účelu .....	38
Obr. 21: Výrobní zařízení M2 Cusing .....	40
Obr. 22: Schéma přibližného rozložení těles na základní desce.....	41
Obr. 24: Tvorba kontury vrstvy vzorkového hranolu .....	42
Obr. 23: Tvorba výplně vrstvy vzorkového válce .....	42
Obr. 25: Deformace „zvedání“ spodních vrstev dvojice vzorkových válců.....	42
Obr. 26: Výsledná zdeformovaná část jednoho z válců.....	42
Obr. 27: Změna zbarvení horní části jednoho ze vzorkových válců .....	43
Obr. 28: Vzorková tělesa bezprostředně po dokončení tisku .....	44
Obr. 29: Rozdělení vzorkových těles pro zkoušky a měření .....	46
Obr. 30: Dělení, účel a označení vzorků (tečkovaná oblast představuje zabarvenou část těles, viz podkapitola 4.3).....	47
Obr. 31: Upřesněné schéma odběru vzorků, červeně je označena zkoumaná plocha .....	48

Obr. 32: Stereomikroskop Olympus SZX7.....	49
Obr. 33: Pórovitost na leštěném příčném řezu vzorku 22N.....	49
Obr. 34: Pórovitost na leštěném příčném řezu vzorku 41N.....	49
Obr. 35: Pórovitost na leštěném podélném řezu vzorku 22TZ.....	50
Obr. 36: Makrostruktura leptaného povrchu příčného řezu vzorku 42TZ.....	51
Obr. 37: Makrostruktura leptaných povrchů podélných řezů. Vlevo: vzorek 4N, vpravo: vzorek 4TZ.....	52
Obr. 38: Metalografický mikroskop Olympus GX51 .....	54
Obr. 39: Příčný vzorek 2N, textura připomínající texturu.....	55
Obr. 40: Příčný vzorek 42N, oválné řezy svarových vrstev .....	55
Obr. 41: Schéma vzniku oválných řezů svarových vrstev .....	55
Obr. 42: Podélný vzorek 41N, vrstvená struktura .....	56
Obr. 43: Podélný vzorek 22N, svarové vrstvy tvořící konturu .....	57
Obr. 44: Podélný vzorek 41TZ, opakování textury .....	58
Obr. 46: Příčný vzorek 42TZ, detail stopy po odleptané fázi.....	59
Obr. 45: Příčný vzorek 42N, stopy po odleptaných fázích.....	59
Obr. 47: Příčný vzorek 41N, svarová licí struktura .....	60
Obr. 48: Příčný vzorek 22N, mezi-svarová pórovitost .....	61
Obr. 49: Příčný vzorek 22N, porézni shluk .....	61
Obr. 50: Příčný vzorek 42N, póry uvnitř svarových vrstev.....	62
Obr. 51: Podélný vzorek 41TZ, interkrystalické mikrotrhliny .....	63
Obr. 52: Příčný vzorek 41N, stopy po odleptaných částicích na hranicích zrn.....	64
Obr. 53: Příčný vzorek 41N, detail stop po odleptaných částicích propojených mikrotrhlinou .....	64
Obr. 54: SEM příčný vzorek 42TZ, detail důlků .....	65
Obr. 55: SEM příčný vzorek 21TZ, detail důlků .....	66
Obr. 56: SEM Příčný vzorek 21TZ, plocha podrobena prvkovému mappingu.....	67
Obr. 57: SEM Příčný vzorek 21TZ, snímky pořízených prvkových map .....	68
Obr. 58: SEM příčný vzorek 42TZ, umístění měřené úsečky .....	69
Obr. 59: SEM příčný vzorek 42TZ, průběh koncentrací prvků po linii .....	70
Obr. 60: Mössbauerovo spektrum neřezové plochy vzorku .....	71
Obr. 61: Mössbauerovo spektrum plochy řezu vzorku.....	72
Obr. 62: Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy .....	78
Obr. 63: Lomová plocha vzorku 400TZ .....	80
Obr. 64: Lomová plocha vzorku 400TZ, detail pórovitosti.....	81

Obr. 65: Lomová plocha vzorku 400TZ, detail sférických částic .....	82
Obr. 66: SEM Lomová plocha vzorku 400TZ, detail tvárného lomu.....	82
Obr. 67: SEM lomová plocha vzorku 200TZ .....	83
Obr. 68: SEM lomová plocha vzorku 200TZ, detail křížení svarových vrstev .....	84
Obr. 69: SEM lomová plocha vzorku 200TZ, detail svarových stop oddělených póry .....	84
Obr. 70: SEM lomová plocha vzorku 200TZ, detail pozorovaného kvazištěpného lomu...	85

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Chemické složení prášku dle výrobce .....	37
Tabulka č. 2: Orientační mechanické vlastnosti oceli AISI 316L ve stavu po rozpouštěcím žihání.....	37
Tabulka č. 3: Zadání výroby vzorkových těles .....	39
Tabulka č. 4: Vybrané výrobní parametry .....	41
Tabulka č. 5: Výsledky hodnocení pórovitosti .....	52
Tabulka č. 6: Srovnání pórovitosti mezi 400W a 200W vzorky .....	53
Tabulka č. 7: Rozdíl v pórovitosti mezi vzorky odebranými ze „základní“ části a horní zbarvené části vzorkových válců .....	53
Tabulka č. 8: Výsledky GD-OES spektrální analýzy chemického složení.....	74
Tabulka č. 9: Výsledky zkoušky tahem provedené v laboratoři VÍTKOVICE TESTING CENTER.....	75
Tabulka č. 10: Výsledky zkoušky tahem provedené na VŠB-TUO .....	75
Tabulka č. 11: Průměrné hodnoty u jednotlivých sad .....	76
Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty nárazové práce $KV_2$ .....	78
Tabulka č. 13: Naměřené hodnoty tvrdosti HV30 .....	86

## Seznam grafů

Graf č. 1: Režim tepelného zpracování.....	44
Graf č. 2: Srovnání průměrných hodnot smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti $R_m$ ...	76
Graf č. 3: Srovnání průměrných hodnot tažnosti $A_5$ .....	77
Graf č. 4: Srovnání průměrných hodnoty nárazové práce $KV_2$ .....	79
Graf č. 5: Srovnání průměrných hodnot tvrdosti HV30 .....	86
Graf č. 6: Souhrnné výsledky mechanických zkoušek .....	87